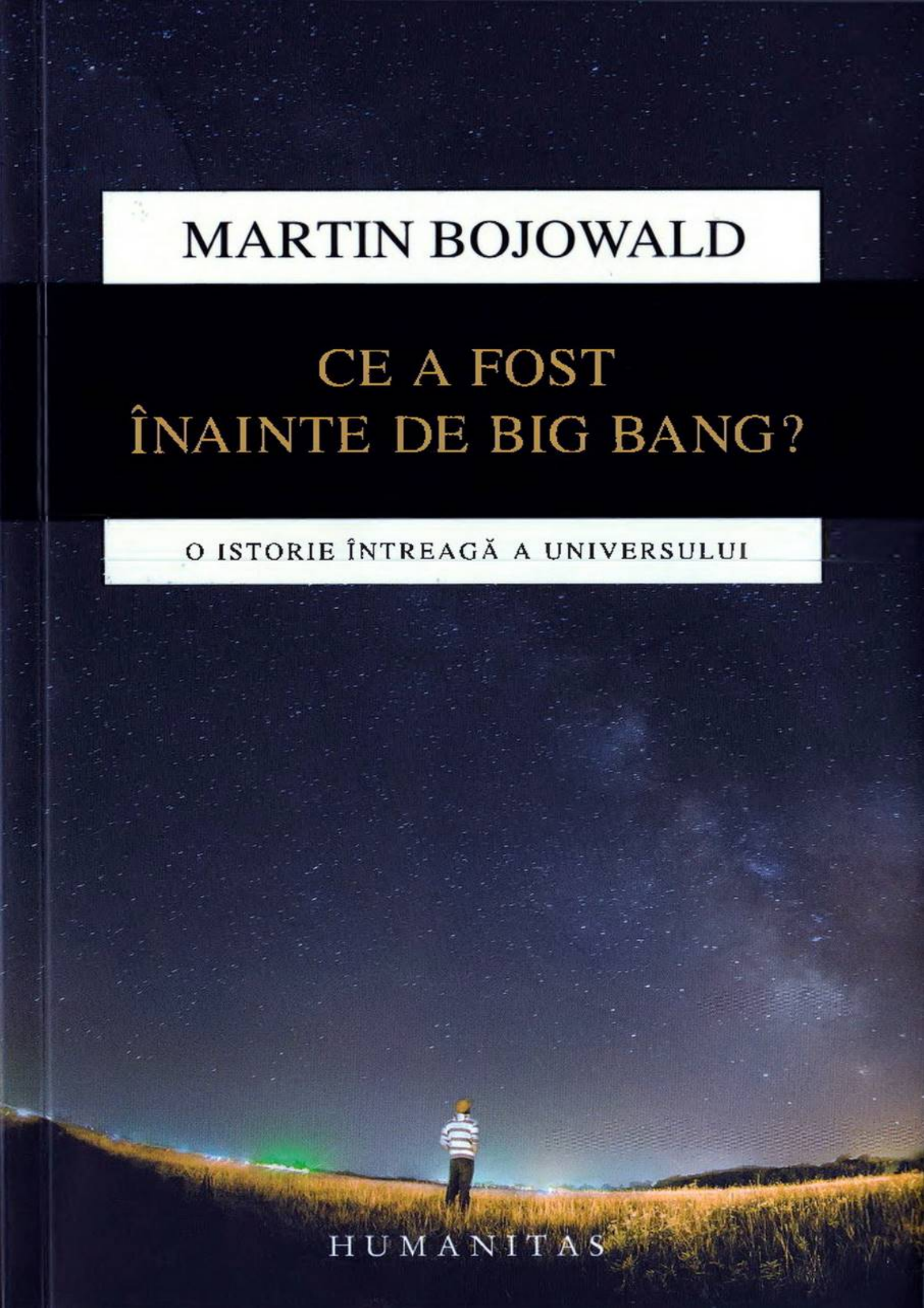
MARTIN BOJOWALD

CE A FOST ÎNAINTE DE BIG BANG?

O ISTORIE ÎNTREAGĂ A UNIVERSULUI



HUMANITAS

MARTIN BOJOWALD

CE A FOST ÎNAINTE DE BIG BANG?

O istorie întreagă a universului

Traducere din engleză de VLAD ZOGRAFI

HUMANITAS, BUCUREŞTI
2016

ISBN 978–973–50–4859–4

Martin Bojowald
Once Before Time. A Whole Story of the Universe
Originally published in German as
Zurück vor den Urknall. Die Ganze Geschichte des Universums,
2009

CUPRINS

Prefață

Introducere

CAPITOLUL 1. **Gravitația.** Atracția masei

Legea newtoniană a gravitației: Acțiunea la distanță și un neajuns fatal

Relativitatea spațiului și timpului: Transformări în stațiu-timp

Relativitatea generală: Spațiul și timpul se dezlănțuie

Spațiul-timp curb: O scenă care se zguduie sub greutatea actorilor

Granițele spațiului și timpului: Sfârșitul unei teorii

Absența respingerii: Pericolul de a fi prea atrăgător

CAPITOLUL 2. **Teoria cuantică.** Stabilitate incertă

Stabilitatea atomică: Prețul unei vieți îndelungate

Funcția de undă: Fluctuații, superpoziții, limitări

Atomii: Stabilitate din inconstanță

Limita clasică și forțele efective: Spargerea valurilor

Radiația corpului negru: E simplu să te îmbraci în negru

Scările Planck: Despre enormitatea cuantică

CAPITOLUL 3. **Un interludiu despre rolul matematicii.** Începe lumea într-o ecuație?

Matematică doar de dragul ei? Matemagia

Utilizarea abuzivă a infinitului: Șmecheriile fizicii

Despre ipoteze și teorii: Codul de conduită al teoreticianului

CAPITOLUL 4. **Gravitația cuantică.** Încercarea de a combina totul

Abordările gravitației cuantice: Puterea stă în diversitate

Teoria corzilor: Cea mai bogată simfonie

Gravitația cuantică cu bucle: Atomi de spațiu și întuneric
Comparație: mere și portocale
Gravitația cuantică cu bucle: Luminând întunericul
Începuturile: Jocuri mintale
Mai multe detalii: Garduri, fibre, filigrane
Universul discret: Țeserea istoriei lumii
Cosmologia cuantică cu bucle: Netezirea atomilor
Mai puțin înseamnă mai mult: Cum să câștigi timp
Evitarea singularității: Ricoșeul întregului univers
Despre folosirea matematicii – un exemplu: Trecerea prin starea infernală
Așadar, ce s-a întâmplat de fapt înainte de big bang? Întrebarea ultimă
Impenetrabilitate: Prin ceața trecutului
Uitarea cosmică: Amintiri încețoșate
Limite: Nu există oare niciun răspuns ultim?

CAPITOLUL 5. **Cosmologia observațională.** Sondarea întregului univers, a trecutului și viitorului

Triada cosmologiei observaționale: Un triumvirat puternic
Fondul cosmic de microunde: Distribuții cerești
Cartografierea galaxiilor: Milioane și milioane de Căi-Lactee
Supernovele: Ultimele cuvinte înțelepte ale stelelor muribunde
Presiunea negativă: Respingerea greu sesizabilă
Energia întunecată: Cele 70 de procente necunoscute
Inflația: Speculații privind universul timpuriu
Poate fi observată gravitația cuantică? În căutare de indicii
Alte posibilități de testare: Să nu renunți niciodată
Nucleosinteza big bang: Prepararea elementelor
Spațiul-timp ca un cristal: Giuvaere goale
Găurile negre: Lumi ale întunericului

CAPITOLUL 6. **Găurile negre.** Colaps și un final fericit?

Calea către o gaură neagră: A te juca cu focul
Primele stele: Arderea combustibilului
Piticele albe: Reci și compacte
Stele neutronice: Ultima revoltă

Singularitatea centrală: Un înspăimântător punct în timp
Orizonturi: Punctul dincolo de care nu există cale de întoarcere
Singularități nude și cenzura cosmică: Lege și decență
Gravitație analogă: Găuri negre comune
Teoria cuantică a găurilor negre: Să-l faci pe cel fără glas să vorbească
Evoluție cosmică? Nașterea lumilor
Radiația Hawking și pierderea informației: Dispare totul în neant?
Gravitația cuantică a găurilor negre: Viața trebuie să continue

CAPITOLUL 7. **Săgeata timpului.** O lume care îmbătrânește

Conceptul de timp: Raportarea la mișcare
Entropia: Comportament dezordonat
Săgeata timpului: O lume în haos

CAPITOLUL 8. **Cosmogonia.** Mituri și metodologie

Analogii: Asemănări înșelătoare
Miturile: Viața universală
Teoriile: Lumea din mintea unui om
Filosofia presocratică: Durerile nașterii cosmologiei
Cosmologie fizică: Evoluție ciclică
Cosmologia cuantică cu bucle: Închiderea cercului

CAPITOLUL 9. **O singură lume.** Știința ideală

Problemele valorii inițiale: Momentul adevărului
Funcția de undă a universului: Cuprinzând totul
Un univers – nici un univers: Pruncul din covată
Reprezentări fizice: Nimicul fără frontiere
Condiții inițiale dinamice: Legi măreț
O singură lume? Ultimul ideal
O teorie universală? Fizică și orgoliu
Principiile: Fundamentele științei
O singură teorie, o singură soluție? Ai grijă ce-ți dorești

CAPITOLUL 11. **Limitele științei și noblețea naturii**

MARTIN BOJOWALD s-a născut în 1973 la Jülich, în Germania. A studiat fizica la Universitatea din Aachen, unde şi-a susţinut şi doctoratul în anul 2000. După ce a lucrat câţiva ani la Institutul Max Planck pentru Fizica Gravitaţiei de la Potsdam, a obţinut o bursă postdoctorală la Universitatea de Stat din Pennsylvania, unde în prezent este profesor. A avut contribuţii de pionierat în gravitaţia cuantică cu bucle şi este iniţiatorul cosmologiei cuantice cu bucle.

Prefaţă

…iar dacă n-o face doar pentru propria-i plăcere, nu-i un artist adevărat.

Oscar Wilde, *Sufletul omului în socialism*

Sunt o mulţime de motive ca un om de ştiinţă să scrie o carte adresată publicului larg, şi o mulţime de motive să n-o facă. În ştiinţă, cercetarea are întâietate, prin ea se făuresc cariere şi se dobândesc onoruri. Tot restul înseamnă pierderea unui timp preţios – cel puţin în ochii multor colegi care într-o bună zi ar putea fi puşi să-ţi evalueze munca.

Dar la ce bun tot progresul ştiinţific dacă nu poate fi comunicat? Înţelegem oare cu adevărat lumea dacă n-o putem explica fără să pretindem studii îndelungate şi dificile? Să înveţi o materie complicată adeseori înseamnă pur şi simplu să-i accepţi elementele şi principiile esenţiale, să te obişnuieşti cu metodele ei standard de calcul. Adevăratul test al înţelegerii noastre îl trecem abia când cunoştinţele pot fi explicate unui neiniţiat receptiv, lipsit de idei preconcepute. În acest sens, mecanica cuantică, în ciuda nenumăratelor ei succese şi aplicaţii tehnologice, e departe de a fi înţeleasă (după cum se va vedea în capitolul 3 al cărţii de faţă). A scrie o carte de popularizare este deci un exerciţiu de importanţă capitală pentru munca unui om de ştiinţă.

Mai mult, o carte adresată publicului larg e prilejul cel mai nimerit pentru a ilustra unitatea ştiinţei, literaturii şi artei. În toate aceste domenii

încercăm să ne făurim o reprezentare a lumii şi s-o comunicăm. Această unitate, desigur, nu există în realitate, e doar un ideal. Dar o carte ce-şi propune să fie larg accesibilă are dreptul să năzuiască spre acest ideal. De aceea le sunt recunoscător acelora care m-au ajutat să intuiesc acest ideal. În ce priveşte arta, îi mulţumesc lui Gianni Caravaggio[1], cu care am purtat câteva discuţii lămuritoare, iar unele dintre lucrările lui sunt reproduse aici. Îi mulţumesc, de asemenea, lui Rüdiger Vaas[2], care, de-a lungul anilor, m-a ajutat să înţeleg şi să comunic ce am înţeles. El a fost printre primii care au găsit că rezultatele mele ştiinţifice merită să [fie] prezentate publicului larg. Mulţi alţii, pe care spaţiul nu-mi îngăduie să-i pomenesc aici, m-au îndemnat mereu să ies din turnul de fildeş străşnic fortificat al ştiinţei.

Această carte n-ar fi apărut fără propunerea lui Jörg Bong, de la Editura S. Fischer, de a o scrie şi fără sprijinul permanent al lui Alexander Roesler. Le sunt recunoscător lui Gisele Ben-Dor, Maryam Shaeri şi Hannah Williams pentru că au citit părţi din manuscris şi mi-au făcut sugestii utile. Mulţumesc Departamentului de Fizică al Universităţii de Stat din Pennsylvania, care creează o atmosferă extrem de plăcută şi de stimulatoare pentru membrii săi. Mi-a acordat un semestru liber, fără să cunoască planurile mele de a scrie o carte! Institutul pentru Gravitaţie şi Cosmos al universităţii mi-a oferit prilejul unor discuţii şi cercetări multidisciplinare legate de subiectele din această carte. Competenţa multor colegi de-ai mei a intrat, cel puţin pe căi subliminale, în scrisul meu.

Le mulţumesc lui Elisabeth şi Stefan Bojowald pentru lectura critică a primei versiuni a cărţii şi pentru unele indicaţii, cum sunt cele privind reprezentările ciclice din arta egipteană. Frumuseţea peisajului din munţii Eifel, unde îşi au ei cabana, m-a inspirat în unele pasaje.

Colegiul de Stat, Pennsylvania
aprilie 2008

Introducere

Cu cât mai abstract e adevărul pe care vrei să-l faci cunoscut, cu atât mai multă osteneală trebui-va să depui pentru a-ţi seduce simţurile de partea lui.

Nietzsche, *Dincolo de bine şi de rău*[3].

Ştiinţa a urmărit dintotdeauna să ajungă la o cunoaştere cât mai cuprinzătoare a legilor lumii noastre, la o descriere cât mai limpede a ceea ce vedem şi experimentăm, să se apropie cât mai mult de ceea ce poate fi considerat adevărul – pe o cale nesubiectivă, singura pe care o ia în considerare.

În cursul ultimului secol, cercetările din fizică au izbutit să clădească edificii teoretice impunătoare: mecanica cuantică şi relativitatea generală. A devenit posibilă înţelegerea naturii la scară mare şi la scară mică, de la întregul univers, în cosmologie, până la molecule, atomi, ba chiar şi particule elementare, prin mijloacele teoriei cuantice. Au rezultat descrieri precise şi pătrunzătoare ale unui spectru larg de fenomene, confirmate spectaculos de observaţii. Cosmologia universului timpuriu a cunoscut, mai cu seamă în ultimul deceniu, un succes impresionant.

Dincolo de relevanţa lui tehnologică în aproape toate aspectele vieţii de zi cu zi, progresul ştiinţific se vădeşte limpede în faptul că anumite domenii ale cercetării au atins probleme care, tradiţional, ţineau de filosofie (dând naştere termenului „metafizică experimentală”, creat de fizicianul şi filosoful Abner Shimony). De la Aristotel încoace, rostul tuturor teoriilor a fost să lămurească

fenomenele generale şi să explice cauzele lor, iar nu să adune fragmente de cunoaştere disparate. Pe de altă parte, filosofia e în căutarea celor mai adânci origini şi principii a tot ce există. În acest sens, contopirea unor teme din fizică şi din filosofie poate fi considerată o trăsătură distinctivă a progresului ştiinţific. Când conduce la asemenea probleme, fizica dobândeşte un statut care o îndreptăţeşte să participe la dezbateri de interes mult mai larg şi cu consecinţe mult mai profunde, în contextul combinării cosmologiei cu teoria cuantică, principala problemă este cea a apariţiei universului şi a fazelor sale timpurii, o problemă care a frământat omenirea de la începuturile filosofiei, ba chiar dinainte.

Alte probleme care i-au preocupat pe gânditori de-a lungul veacurilor, şi care rămân de mare însemnătate în teoria cuantică şi în relativitatea generală, sunt legate de rolul jucat de observator şi de ce anume poate fi observat. În cosmologie, introducerea metodelor de cercetare din fizică a condus la apariţia scenariilor empiric testabile pentru întregul univers. Modelul big bang se întemeiază pe relativitatea generală – ca descriere a spaţiului, timpului şi forţei gravitaţionale – şi pe teoria cuantică, indispensabilă pentru înţelegerea proprietăţilor materiei în universul timpuriu. Din acestea rezultă o explicaţie uimitoare pentru apariţia întregii materii – nuclee, atomi şi toate obiectele compuse, până la galaxii – din faza iniţială extrem de fierbinte.

Ajunşi în acest stadiu, limitele teoriilor în vigoare devin vizibile. În pofida tuturor succeselor lor, relativitatea generală şi mecanica cuantică, aşa cum le aplicăm astăzi, nu oferă o descriere completă a universului. Când rezolvăm ecuaţiile relativităţii generale, în speranţa de a găsi un model al evoluţiei în timp a universului şi al istoriei lui pe termen lung, ajungem în mod inevitabil într-un punct – aşa-numita *singularitate*

big bang – în care temperatura universului era infinită. Nu e de mirare că universul era foarte fierbinte în faza big bang-ului – universul era pe-atunci mult mai mic şi mai dens decât acum, deci avea o temperatură mult mai ridicată. Totuşi, când o teorie fizică dă un rezultat infinit, înseamnă că ea a fost împinsă dincolo de limitele ei; în aceste condiţii, ecuaţiile ei îşi pierd orice semnificaţie. În cazul modelului big bang, punctul în care ecuaţiile îşi pierd sensul nu trebuie confundat cu începutul lumii, deşi adesea lucrurile aşa sunt prezentate. Un punct în timp la care ecuaţiile matematice dau o valoare infinită nu e începutul (şi nici sfârşitul) timpului, ci un loc în care teoria îşi arată limitele. În ciuda succeselor ei în alte domenii, teoria dată de combinarea relativităţii generale cu teoria cuantică a materiei rămâne să fie extinsă.

Problema constă în faptul că revoluţia din fizica ultimului secol nu a fost încheiată. Teoria cuantică e folosită pentru a descrie materia din univers, dar nu şi gravitaţia şi spaţiul-timp însuşi. Acestea din urmă ţin de relativitatea generală, în mare măsură independentă de fizica cuantică. O combinaţie reuşită a teoriei cuantice cu relativitatea generală, chiar şi în domeniile spaţiului şi timpului, ar extinde mult teoriile cunoscute. O asemenea combinaţie – *gravitaţia cuantică* – e mai cu seamă importantă pentru descrierea fazei fierbinţi big bang a universului, şi sperăm să poată explica ce s-a întâmplat la infinitul singularităţii big bang. Este oare aceasta originea lumii şi a timpului, sau a existat ceva înainte? Iar dacă a existat ceva înainte de big bang, ce anume a fost?

Din păcate, gravitaţia cuantică e extrem de complicată. Chiar şi luate separat, relativitatea generală şi teoria cuantică se disting printr-un aparat matematic necunoscut ramurilor fizicii dinaintea lor. Mai mult, aceste două domenii folosesc metode matematice foarte diferite. Combinarea teoriilor fizice necesită şi unificarea

principiilor matematice subiacente, sporind şi mai mult gradul lor de dificultate. Din acest motiv, în ciuda deceniilor de cercetări stăruitoare ale fizicienilor, nu dispunem încă de o teorie cuantică a gravitaţiei complet formulată. Totuşi, au apărut, mai ales în ultimii ani, numeroase indicii promiţătoare privind proprietăţile gravitaţiei cuantice, care pot fi deja analizate. Aşa cum se întâmplă adesea în cercetare, situaţia seamănă cu primele etape din asamblarea unui puzzle, când putem bănui ce imagine va rezulta, dar ne putem afla şi pe o pistă falsă. Cunoştinţele actuale ne arată ce ne-ar putea aduce o completare a teoriei fizice – ne permit să întrezărim ce s-a întâmplat pesemne la big bang, ba chiar şi înainte de el. Ni se îngăduie să aruncăm o privire către primele momente ale universului şi, pentru prima dată, putem analiza felul în care, probabil, a apărut.

În această carte sunt explicate rezultate recente ale teoriei şi planuri pentru observaţiile prin satelit, subliniindu-se cât de mult ar putea ele schimba perspectiva noastră. Gravitaţia cuantică cu bucle [*loop quantum gravity*], unul dintre candidaţii pentru combinarea relativităţii generale cu teoria cuantică, ne-a oferit primele rezultate privind o descriere nesingulară a big bang-ului. Conform ei, universul a existat înainte de big bang şi putem estima în linii mari cum se deosebea el de ceea ce vedem acum. Prin influenţa ei asupra etapelor ulterioare de expansiune cosmică, detectabile în observaţii de mare fineţe, această preistorie a universului poate fi explorată. Cartea de faţă consemnează cercetările autorului în această direcţie, după care urmează o discuţie privind găurile negre, care prezintă, de asemenea, efecte fascinante. Capitolele de la sfârşit se referă şi la alte teme ţinând de înţelegerea generală a universului, între care cosmogonia, problema timpului şi a direcţiei sale şi aşa-numita „teorie universală”. În paralel cu prezentarea progresului

ştiinţific, va apărea, din perspectivă personală, şi latura umană a cunoaşterii, prin exemple din cercetările actuale.

Deşi teoria implicată aici face apel la o matematică avansată, multe calcule pot fi de pe-acum înţelese intuitiv. Intuiţia nu e folositoare doar în explorarea unui teritoriu necunoscut, ci permite şi explicaţii simple. După cum sugerează citatul din Nietzsche de la începutul introducerii, această carte îşi poate atinge ţinta fără a recurge la formalismul matematic, cu excepţia unei singure ecuaţii esenţiale din capitolul 4. Cu toate că nu ne putem dispensa de matematică dacă vrem să înţelegem până la capăt problemele care stau la baza acestei cărţi, o percepere intuitivă e posibilă fără un efort prea mare. Nu întotdeauna va fi evident de ce lucrurile stau într-un fel, şi nu în altul, dar, dacă aveţi încredere în călăuza care vă însoţeşte, legăturile pot fi întrezărite.

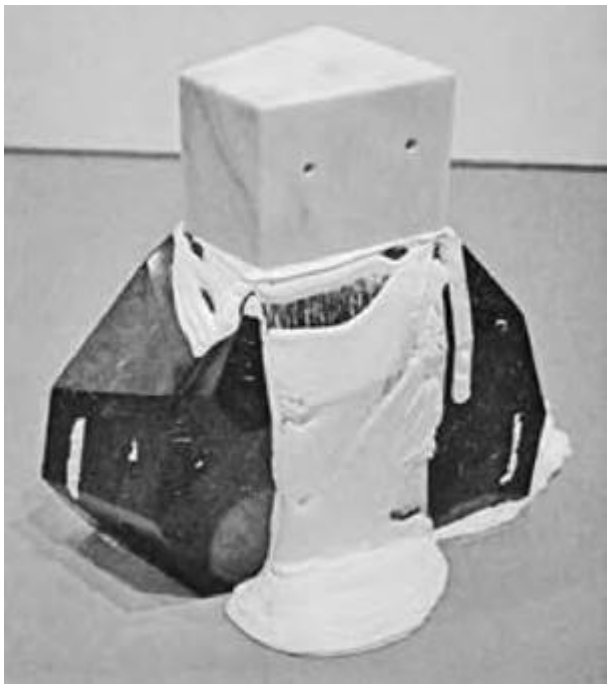


Figura 1. *Piatra filosofală se topeşte. La o cercetare mai atentă, ceea ce, credem că e o cunoştinţă certă s-ar putea dovedi că necesită corecţii. Evaluarea rezultatelor sau perspectivelor ştiinţei trebuie să ţină cont de limitele ei. Deseori, aceste limite sunt mai importante chiar decât rezultatele stabilite, căci ele ne arată calea*

spre noi descoperiri. (Sculptură de Gianni Caravaggio: Spreco di energia assoluta [Irosire absolută de energie], *2006. Fotografie de Robert Marossi.)*

Se cuvine totuşi să facem o precizare. Multe domenii de cercetare din gravitaţia cuantică rămân încă la nivelul speculaţiilor. Spre deosebire de prima jumătate a secolului trecut, perioada în care s-au dezvoltat relativitatea generală şi mecanica cuantică, nu există deocamdată observaţii care să fie coroborate cu formulările teoretice ale gravitaţiei cuantice. Ceea ce stimulează acum cercetarea e un ansamblu eterogen de consideraţii conceptuale privind incompletitudinea relativităţii generale şi de condiţii de consistenţă matematică în formularea ecuaţiilor. De pildă, nu există nicio garanţie că din combinarea unor metode matematice, aşa cum le folosim în relativitatea generală şi în fizica cuantică, vor rezulta soluţii pentru o descriere realistă a universului. Instrumentele matematice sunt atât de restrictive, încât formularea unei teorii cu soluţii rezonabile ar reprezenta în sine un succes imens. Dacă pot exista şi alte teorii rezonabile este o altă problemă, neînţeleasă pe deplin deocamdată. Aceasta demonstrează fragilitatea pilonilor pe care se susţine în prezent gravitaţia cuantică. Avem totuşi motive de optimism, căci numeroase dovezi independente, cum sunt cele prezentate în această carte, sunt convergente. Mai mult, ne aşteptăm ca observaţiile cosmologice din viitorul nu prea îndepărtat să poată dezvălui fenomene prezise de gravitaţia cuantică. Aceste posibile observaţii, prezentate şi ele în cartea de faţă, ar putea face în cele din urmă din gravitaţia cuantică o teorie testată empiric.

Stadiul actual al gravitaţiei cuantice seamănă cu etapele de început ale dobândirii unui nou teritoriu. Matematica săvârşeşte opera de pionierat de a deschide noi domenii dincolo de frontierele

stabilite. În cazul nostru, aceste frontiere sunt cele ale universului şi timpului. Matematica serveşte, de asemenea, la explorarea pământurilor cucerite, dar, într-o ştiinţă empirică aşa cum e fizica, aceste pământuri pot fi luate în stăpânire şi deveni sigure doar prin observaţii. Sarcina aceasta rămâne de îndeplinit pentru gravitaţia cuantică, un teritoriu încă primejdios, în care te poţi lesne rătăci sau poţi fi înghiţit în mlaştinile speculaţiei.

Pentru a stăpâni un asemenea teritoriu e nevoie de o smerenie faţă de natură, care nu se manifestă întotdeauna. Deseori, fizicienii vorbesc cu o încredere excesivă (uneori chiar cu aroganţă), dar, atunci când e vorba de o lege a naturii, nu trebuie să uităm că: „S-ar putea să fie corectă, s-ar putea să fie greşită. Dacă nu e corectă, omul de ştiinţă e de vină, nu natura.”[4] Fizicianul construieşte legile naturii şi e răspunzător dacă ele nu funcţionează. Nimeni nu se supune fizicianului, şi cu atât mai puţin natura. Acest lucru e adevărat mai cu seamă pentru schiţe teoretice aşa cum e gravitaţia cuantică. Până când observaţiile ne vor arăta dacă natura manifestă măcar un minim respect faţă de legile care i se impun, intuiţia ne va fi călăuză în acest teritoriu necunoscut – într-o cutezătoare călătorie în timp care ne va duce înainte de big bang.

CAPITOLUL 1.
Gravitaţia.
Atracţia masei

De-mi cade de la geam ceva
(oricât de mic ar fi), ce tare,
o, legea gravitaţiei, aşa
ca vântul mării, peste-oricare
balon sau bob se-azvârle, ca
în mijlocul pământului să-l ia.

Rainer Maria Rilke, *Ceaslovul*[5]

Pe distanţe mari, universul e guvernat de legea gravitaţiei, în fizică, acţiunea unei forţe e cauza mişcării sau a oricărei forme de transformare. Repausul total e posibil doar atunci când nu acţionează nicio forţă netă. Acest lucru se poate întâmpla, de pildă, în absenţa oricărei materii – o stare numită vid. Numai că materia există, iar masa ei face să apară forţe gravitaţionale care acţionează asupra altor mase. Pentru a se ajunge, cel puţin aproximativ, la stări de repaus, toate forţele care acţionează trebuie să se compenseze reciproc. În afară de gravitaţie, trebuie să ţinem cont de forţele electrică şi magnetică, precum şi de două tipuri de forţe numite interacţia tare şi interacţia slabă, care domnesc pe tărâmul particulelor elementare.

Forţa electrică e compensată pe distanţe mari datorită existenţei sarcinilor pozitive şi negative, care se neutralizează reciproc, iar forţele care apar în interiorul nucleelor acţionează doar la distanţe

extrem de scurte. Prin urmare, la distanţe mari se simte numai efectul gravitaţiei. Ea guvernează atracţia generală a maselor şi a distribuţiilor de energie din spaţiu, dictând astfel comportamentul universului însuşi. Spre deosebire de cazul electricităţii, nu există mase negative: atracţia gravitaţională nu poate fi complet compensată. Odată ce se formează obiecte masive, cum sunt stelele sau galaxiile, interacţia gravitaţională rezultantă controlează tot ce se întâmplă. Proprietăţile acestei atât de bine cunoscute forţe – de multe ori ignorată în cercetările recente, dar care în cosmologie şi în problemele legate de găurile negre produce efecte stranii – sunt subiectul cărţii de faţă.

Legea newtoniană a gravitaţiei:
Acţiunea la distanţă şi un neajuns fatal

Prima lege generală a gravitaţiei a fost formulată de Isaac Newton. Aşa cum s-a întâmplat cu multe descoperiri importante din domeniul gravitaţiei, dezvoltarea teoriei a presupus o perspectivă comună asupra bine cunoscutelor fenomene de pe Pământ şi asupra unui mare număr de observaţii complicate ale obiectelor din spaţiu – Luna şi unele planete. Acestea din urmă au fost posibile graţie unor tehnologii care, la vremea aceea, erau foarte sofisticate, iar cercetările teoretice, la rândul lor, au stimulat crearea de noi instrumente. În multe domenii ale ştiinţei, şi în special în cercetările legate de gravitaţie, combinarea întrebărilor fundamentale cu aplicaţiile tehnologice s-a dovedit mereu fructuoasă.

Încă înainte de Newton, mulţimea datelor acumulate de astronomi precum Tycho Brache şi Johannes Kepler a fost ordonată sub forma unui model al sistemului solar. De la Copernic şi Kepler, în linii mari, modelul a rămas neschimbat până în zilele noastre: planetele orbitează în jurul Soarelui de-a lungul unor traiectorii care, cu o bună aproximaţie, pot fi considerate elipse (cercuri uşor turtite). Dar ce anume propulsează planetele pe traiectoriile lor curbe? Din observaţiile obişnuite ştim că, pentru a împiedica un corp să se deplaseze de-a lungul unei linii drepte, e nevoie de o forţă. Cum poate fi descrisă, sau măcar explicată, această forţă în cazul planetelor?

Descoperirea revoluţionară a lui Newton existenţa unei forţe universale a gravitaţiei, răspunzătoare nu doar de mişcarea planetelor în jurul Soarelui şi a Lunii în jurul Pământului, dar şi

de căderea obiectelor din viaţa de zi cu zi – e impresionantă, E un excelent exemplu privind originea explicaţiei ştiinţifice: nu e un răspuns la întrebarea „de ce?”, în sensul unei motivaţii antropomorfe, ci reducerea unei mulţimi de fenomene, aparent fără legătură între ele, la un mecanism unic – o lege a naturii. Descrierea matematică a lui Newton e compactă şi foarte eficientă pentru prezicerea unor noi fenomene care se supun aceleiaşi legi. În cazul legii newtoniene a gravitaţiei, a fost în repetate rânduri folosită capacitatea ei de face predicţii – de pildă, pentru a găsi noi planete prin micile devieri, datorate atracţiei lor, ale traiectoriilor altor planete, sau pentru misiunile sateliţilor moderni.

Asemenea poveşti de succes, în care o descriere matematică elegantă explică şi prezice o multitudine de fenomene, pot fi întâlnite pretutindeni în fizică şi sunt momentele de referinţă ale progresului ei. Retrăirea acestor descoperiri oferă deseori o satisfacţie atât de mare, încât oamenii de ştiinţă folosesc cuvântul „frumuseţe” – un tip pragmatic de frumuseţe, a cărei esenţă, formularea matematică, nu poate fi sesizată decât de iniţiaţi, dar care, prin succesele ei concrete, poate fi sesizată şi de nespecialişti.[6]

Legea newtoniană a gravitaţiei descrie forţa de atracţie dintre două corpuri provocată de masele lor. Ea creşte proporţional cu valorile maselor (atracţia dintre două corpuri grele e mai mare decât cea dintre două corpuri uşoare) şi e invers proporţională cu pătratul distanţei dintre corpuri (scade mult când corpurile sunt îndepărtate). În plus faţă de aceste relaţii de proporţionalitate, mărimea forţei e determinată de un parametru matematic numit acum *constanta gravitaţională a lui Newton,* în care putem vedea unificarea fenomenelor terestre cu cele astronomice. Valoarea constantei gravitaţionale poate fi obţinută măsurând atracţia minusculă a două mase de pe

Pământ, ceea ce a făcut pentru prima dată Henry Cavendish în 1797, iar cu ajutorul ei pot fi deduse orbitele planetelor în jurul Soarelui.

Forţa gravitaţională a lui Newton depinde de distanţă, dar nu depinde de timp. Independenţa de timp e plauzibilă, căci o lege a naturii trebuie să fie valabilă la orice moment, şi e în acord cu perspectiva asupra spaţiului şi timpului din vremea lui Newton şi din experienţa noastră curentă. Putem schimba poziţiile şi distanţele obiectelor în spaţiu, dar spaţiul însuşi pare imposibil de schimbat. De asemenea, timpul pare să se scurgă uniform, fără să fie influenţat de procese fizice sau de aparate de măsură. Din moment ce, conform lui Newton, gravitaţia acţionează instantaneu – independent de distanţa dintre mase forţa e dată pentru două corpuri care nu se află în acelaşi loc, dar sunt considerate la acelaşi moment de timp.

În ciuda formei plauzibile şi a succeselor ei, teoria lai Newton avea un neajuns, exista o imperfecţiune în frumuseţea ei. La fel ca frumuseţea teoriei, şi această imperfecţiune poate fi înţeleasă complet doar cu un bagaj mai consistent de cunoştinţe, însă chiar şi o privire superficială asupra ei ne poate da o idee despre problemele cu care se confruntă fizica teoretică. Se spune că Newton însuşi era nemulţumit de tendinţele „animalice” ale legii gravitaţiei: aşa cum un animal e atras de la mare depărtare de perspectiva hranei sau a împerecherii, un corp masiv se deplasează de la distanţă spre un altul. Această acţiune la distanţă, fără contact direct, a fost considerată un mare neajuns conceptual, în pofida tuturor succeselor concrete ale teoriei.

Această dificultate e extrem de greu de înlăturat construind o teorie doar a interacţiilor locale, care trebuie totuşi să rămână compatibilă cu predicţiile astronomice ale lui Newton. Suntem obligaţi să considerăm şi dimensiunea temporală, pentru că mici asemenea interacţii locale îi trebuie un timp

ca să se propage de la un corp la altul. O reformulare coerentă e posibilă numai dacă schimbăm radical noţiunile intuitive ale lui Newton (şi ale noastre) de spaţiu şi timp. Pentru aceasta e nevoie de un aparat matematic mult mai complicat şi de mari eforturi, dar ele sunt răsplătite printr-o teorie de o frumuseţe fără egal, în sensul despre care am vorbit mai sus. Neajunsul teoriei lui Newton a fost înlăturat abia de Albert Einstein.

Relativitatea spaţiului şi timpului:
Transformări în staţiu-timp

> Toate acestea au durat o vreme, mai lungă sau mai scurtă: căci, la drept cuvânt, pentru atare lucruri nu începe timp pe lume.
>
> Friedrich Nietzsche, *Aşa grăit-a Zarathusira*[7]

În fizică, şi în genere în ştiinţă, e important să facem deosebirea între proprietăţile care depind de persoana care face observaţia şi cele independente de observator. Masa unei particule ţine numai de particula însăşi, iar, dacă particula rămâne neschimbată, măsurarea ei va da mereu aceeaşi valoare. Lăsând la o parte inevitabilele erori experimentale, nu contează cine face măsurătoarea. Pe de altă parte, viteza particulei variază în funcţie de deplasarea observatorului în raport cu ea. Pentru un observator care se mişcă împreună cu particula, cu exact aceeaşi viteză, ea este în repaus – ca două maşini care merg paralel pe o autostradă. Unuia din şoferi i se pare că celălalt nu se mişcă, alt observator însă vede că maşina (sau particula) se deplasează, şi îi atribuie o viteză diferită de zero. În linii mari, relativitatea e exprimarea matematică a acestui gen de relaţii. Ea ne spune ce putem afla despre natură pe o cale obiectivă, independentă de observator.

Vreme de secole s-a crezut că spaţiul şi timpul nu depind de observator. Distanţele şi duratele păreau să fie absolute, indiferent de poziţia sau de mişcarea observatorului. La sfârşitul secolului al XIX-lea a apărut însă prima breşă în această perspectivă, ceea ce avea să conducă la relativitatea specială. Conform acesteia, spaţiul şi

timpul nu sunt separate – ele sunt îngemănate, interşanjabile şi dependente de observator. La fel ca viteza unei particule, valorile lor măsurate depind de observator. În termeni abstracţi, ele descriu dimensiuni diferite ale unui unic obiect fizic: spaţiul-timp, iar numai conceptul de spaţiu-timp, nu şi spaţiul sau timpul în sine, e independent de cel care face măsurătoarea.

Cum poate fi demonstrat acest lucru prin mijloace fizice? Pentru a răspunde la întrebare şi a explica rolul dimensiunilor, să considerăm la început doar spaţiul. Spaţiul are trei dimensiuni: ne putem mişca la stânga şi la dreapta, înainte şi înapoi, în sus şi în jos. Ne-am putea gândi că nu e vorba de trei dimensiuni ale unui spaţiu unic, ci de trei dimensiuni complet independente – lărgime, adâncime, înălţime numai că acestea nu suni proprietăţi absolute şi independente, ci pot fi transformate una în alta. E de-ajuns să ne rotim în spaţiu pentru a face ca înălţimea unui cub să apară ca lărgime, deci înălţimea şi lărgimea sunt, în acest sens, interşanjabile. Nu avem aici de-a face cu o transformare printr-un proces fizic, cum ar fi o reacţie chimică, ci de una mult mai simplă: o schimbare de perspectivă. Ceea ce luăm drept înălţime, lărgime sau adâncime depinde de locul observatorului (sau de convenţia de a măsura în raport cu suprafaţa Pământului lărgimea şi adâncimea). Ele nu pot fi considerate proprietăţi ale spaţiului însuşi, ca obiect fizic. De aceea vorbim despre spaţiul tridimensional, iar nu despre existenţa, a trei direcţii unidimensionale independente.

Cu timpul lucrurile stau la fel, deşi transformarea lui e mai greu de intuit. E de-ajuns să ne rotim pentru a ne schimba perspectiva asupra spaţiului. Modificarea unghiului sub care privim (sau, mai exact, a tangentei lui, care, pentru unghiuri mici, are aproximativ aceeaşi valoare) e dată de raportul dintre extinderile spaţiale – de

pildă, dintre înălţimea dinainte şi cea de după schimbarea de perspectivă. Modificând unghiul, putem doar transforma extinderile spaţiale între ele. Dacă vrem să transformăm spaţiul în timp, trebuie să facem să varieze o cantitate dată de raportul extinderilor spaţială şi temporală: o viteză. Dacă parcurgem o anumită distanţă într-o perioadă de timp înseamnă că ne deplasăm cu o viteză care este raportul dintre acea distanţă şi acel timp.

În felul acesta ajungem la un fenomen fundamental în relativitatea specială. Dacă ne deplasăm mai repede decât un alt observator în timp ce privim o anumită scenă, distanţele în spaţiu şi în timp ne apar diferit. Aşa cum schimbarea unghiului sub care privim transformă extinderile spaţiale, schimbarea vitezei observatorului comută între ele distanţele de tip spaţial în cele de tip temporal. Distincţia făcută între extinderile spaţiale şi cele temporale depinde deci de perspectivă (sau de „perspectiva traiectoriei", căci ne aflăm în mişcare), şi nu poate avea o bază fizică independentă de proprietăţile observatorilor. Nu există spaţiu şi timp separate, ci doar un obiect unitar: spaţiul-timp. Relativitatea specială e teoria acestor schimbări de „perspectivă a traiectoriei" (consemnate de ceea ce numim *observatori inerţiali),* în absenţa forţei gravitaţionale.

Aceste consideraţii nu trebuie luate ca o demonstraţie. Nu orice raport care se modifică implică o transformare. De pildă, rata natalităţii dintr-o ţară este raportul dintre numărul nou-născuţilor şi populaţia totală, dar o modificare a ratei natalităţii nu înseamnă că locuitorii se transformă în nou-născuţi. Deosebirea importantă faţă de exemplul precedent ţine de rolul observatorilor: modificările sunt produse de faptul că observatorii au poziţii şi stări de mişcare diferite, şi, din moment ce legile fizicii trebuie să fie independente de proprietăţile particulare ale

observatorilor, conceptele definite doar prin punctele de vedere particulare trebuie respinse. În relativitatea specială, această „transformabilitate” a spaţiului şi timpului, care ne obligă să le refuzăm un sens separat, a căpătat nu numai o formă matematică elegantă, dar a fost şi testată experimental de nenumărate ori, în special în reacţiile particulelor elementare. Dacă ideea newtoniană de spaţiu rigid şi timp independent a intrat în contradicţie cu multe măsurători din secolul trecut, în perspectiva relativităţii speciale nu apare nicio contradicţie.

Teoria lui Newton s-a bucurat de succes vreme de secole pentru că abia la viteze foarte mari ale observatorilor apar transformări sesizabile ale spaţiului şi timpului. Fără măsurători extrem de precise şi de fine, pentru a vedea un efect, vitezele trebuie să se apropie de viteza luminii – aproximativ 300.000 de kilometri pe secundă. În viaţa de zi cu zi, transformabilitatea spaţiului şi timpului e imperceptibilă.[8] Pentru testarea ei experimentală avem nevoie fie de viteze foarte mari, fie de măsurători foarte exacte, care să pună în evidenţă infimele modificări la viteze foarte mici. Ambele metode au fost folosite în secolul trecut.

Cu ajutorul orologiilor atomice s-au putut face măsurători de timp extrem de precise, detectându-se astfel transformări spaţio-temporale chiar şi la vitezele la care zboară avioanele. (Din moment ce avioanele se află la o anumită altitudine, apar efecte secundare datorită scăderii gravitaţiei – fenomen explicat de relativitatea generală, despre care vom vorbi mai târziu.)

La viteze apropiate de viteza luminii, spaţiul-timp se modifică spectaculos: conform unui observator în repaus, timpul se transformă aproape complet în spaţiu, iar astfel se scurge foarte încet. Când se atinge viteza luminii – lucru posibil doar pentru obiecte cu masă nulă, cum e însăşi lumina

toate distanţele de tip temporal se anulează. Această limită de viteză nu poate fi depăşită, fiindcă întreg timpul a fost deja folosit pentru a se atinge viteza luminii. Niciun semnal nu poate călători mai repede decât lumina. În orice transmitere a informaţiei apar inevitabil întârzieri; ele pot fi mici, dar, la distanţe mari, devin observabile. (Această viteză maximă este cea a luminii în vid. În mediile transparente cum e apa, lumina se propagă mai încet decât în vid. Acolo semnalele se pot propaga mai repede decât lumina în acele medii, dar nu şi de cât se propagă lumina în vid.)

Pot fi sondate şi vitezele mari, însă nu accelerând violent un ceasornic, ci folosind ceasornice rapide pe care natura ni le pune la dispoziţie. Pământul e bombardat din spaţiu cu particule de energii înalte care ajung la viteze apropiate de cea a luminii.[9] Cele mai multe dintre ele nu ating solul, fiindcă interacţionează cu oxigenul şi azotul din atmosfera superioară, producând noi particule, între care *miuonii.* Miuonii sunt un fel de electroni grei, dar, spre deosebire de electroni, sunt instabili: un miuon în repaus se dezintegrează după o milionime de secundă, rezultând un electron şi alte două particule stabile numite *neutrini.* Timpul de dezintegrare poate fi folosit ca unitate de măsură, dar, la nivelul tehnologiilor actuale, „ceasornicul miuonic” nu e foarte precis. Totuşi, miuonii ajung mult mai uşor la viteze mari decât orologiile atomice, iar ei ajung din belşug pe Pământ, sub forma radiaţiei cosmice.

Miuonii cosmici au confirmat relativitatea specială şi transformabilitatea spaţiului şi timpului. Chiar şi călătorind la vitezele mari pe care le au în atmosfera superioară, timpul lor de viaţă de o milionime de secundă nu le-ar permite să atingă solul. Şi totuşi, detectorii înregistrează un număr mare de asemenea particule, deşi ar fi trebuit să se

fi dezintegrat pe drum. Misterul se lămureşte prin faptul că milionimea de secundă, timp în care miuonul în repaus s-ar dezintegra, durează mult mai mult pentru miuonul care se deplasează cu viteză mare şi e observat de pe Pământ. Graţie vitezei lui mari, din perspectiva miuonului, suficient spaţiu e transformat în timp pentru a ajunge la sol înainte să se dezintegreze.

Pe vremea când Einstein a elaborat teoria relativităţii restrânse, nu se puteau face măsurători cu orologii atomice şi cu miuoni, dar el şi-a dedus ecuaţiile de transformare a spaţiului şi timpului dintr-o analiză profundă a teoriei luminii propusă de James Clerk Maxwell în 1861. (Ca o curiozitate matematică, aceeaşi lege de transformare, fără o interpretare fizică însă, fusese deja găsită de Hendrik Antoon Lorentz.) Aplicarea acestor principii independent de observaţii poate fi comparată cu situaţia în care s-a aflat Newton în faţa imcompletitudinii propriei sale teorii. Aveau să treacă secole până să fie puse în evidenţă abateri de la legea newtoniană a gravitaţiei, dar, după cum am spus, Newton era deja nemulţumit de caracterul ei „animalic”. Ce anume face ca două mase să se atragă, indiferent cât de departe s-ar afla una de alta? Acest neajuns sesizat de Newton devine acut în relativitatea specială.

Pentru că Newton privea separat spaţiul şi timpul, legea gravitaţiei formulată de el nu se confrunta cu dificultăţi de principiu, ci doar de ordin estetic, dar, în relativitatea specială, ea conduce la contradicţii. Forţa gravitaţională newtoniană depinde de distanţa în spaţiu dintre două corpuri, însă timpul nu apare. Ţinând cont de transformabilitatea spaţiului şi timpului, aplicarea strictă a legii ar însemna că forţa gravitaţională trebuie să depindă de starea de mişcare (adică de viteza) aparatului de măsură: o modificare a vitezei trebuie să transforme spaţiul în timp, făcând ca legea lui Newton să fie dependentă de

timp. O distanţă spaţială mai mică ar fi compensată de un interval de timp mai lung, aşa încât toţi observatorii, care se deplasează cu viteze diferite, să calculeze forţa corectă. Această cerinţă n-a fost însă luată în considerare de Newton când şi-a formulat legea – de aici nevoia de a extinde teoria newtoniană.

O situaţie similară apare în electromagnetism. Legea lui Coulomb pentru atracţia (sau respingerea) electrostatică dintre două corpuri încărcate electric e asemănătoare cu cea a atracţiei gravitaţionale dintre două mase – e de-ajuns să înlocuim masele cu sarcinile şi constanta lui Newton cu una analogă pentru forţa electrică. (În plus, trebuie schimbat semnul forţei, care indică direcţia ei: două sarcini de acelaşi semn se resping, în timp ce două mase – întotdeauna pozitive – se atrag.) Dependenţa de distanţă e aceeaşi în ambele cazuri, iar în niciuna din formule nu apare o distanţă în timp. Înainte de Einstein, Maxwell găsise o extindere a legii lui Coulomb pe baza relaţiei dintre fenomenele electrice şi cele magnetice, extindere ce avea să se dovedească a fi în conformitate cu transformabilitatea spaţiului şi timpului, fără ca Maxwell să-şi fi pus însă această problemă.

În 1905, când Einstein a elaborat relativitatea specială, nu exista vreo reformulare a legii lui Newton, iar extinderea acesteia a fost mult mai dificilă decât generalizarea legii lui Coulomb. Au trebuit să mai treacă zece ani pentru ca Einstein să-i dea forma finală – teoria relativităţii generale. Rezultatul a fost nu numai o lege a gravitaţiei în acord cu relativitatea specială, ci o transformare radicală de perspectivă asupra spaţiului şi timpului, precum şi fundamentarea matematică a cosmologici. În continuare, ne vom ocupa cu precădere de structura spaţiului şi timpului, iar abia în capitolul 8 (dedicat cosmologiei) vom

reveni asupra comportamentului universului ca întreg.

Relativitatea generală:
Spaţiul şi timpul se dezlănţuie

Ci fără trudă, cu tăria gândului, zguduie totul.

Xenofan din Colofon[10]

Relativitatea specială nu include forţa gravitaţională, în acest sens nu e deci suficient de generală. Relativitatea generală ne pune la dispoziţie o lege a gravitaţiei în acord cu relativitatea specială şi dă spaţiului-timp un înţeles fizic deplin. Nu numai că spaţiul şi timpul sunt interşanjabile în funcţie de perspectiva observatorului, ca în relativitatea specială, dar spaţiul-timp este dinamic şi e supus proceselor fizice: forma lui e determinată de materia pe care o conţine. Spaţiul-timp nu e un hipercub cvadridimensional drept, plat, extinzându-se neschimbat la infinit, ci se deformează sub acţiunea tensiunilor sale interne, ca o bucată de cauciuc, căpătând o structură curbă. Tensiunea internă a spaţiului-timp este forţa gravitaţională.

Aşa cum la vitezele curente efectele relativităţii speciale sunt greu sesizabile, în mod obişnuit influenţa gravitaţiei asupra spaţiului-timp e slabă. În astrofizică sau în cosmologie însă, avem deseori de-a face cu obiecte atât de grele, încât o descriere precisă trebuie să ţină cont nu numai de materia pe care o conţin, ci şi de proprietăţile spaţiului şi timpului. Aceasta a condus la numeroase testări ale relativităţii generale, precum şi la noi perspective în cosmologie.

În 1915, Einstein nu avea la dispoziţie asemenea observaţii, dar, pornind de la principii, prin deducţii matematice, a construit o teorie a cărei

eleganţă rămâne fără egal în fizică. Urmând tradiţia geometrilor din Antichitatea greacă – Platon şi Euclid – a ajuns la o formă unică a ecuaţiilor care descriu întregul univers.

Einstein s-a străduit mult până să înţeleagă principiile corecte şi matematica de care avea nevoie, dar succesul a fost imens. Nu numai că teoria lui satisfăcea cele mai înalte exigenţe matematice, ci putea explica şi numeroase observaţii în faţa cărora teoria lui Newton era neputincioasă.

Asemenea consecinţe importante justifică, fără îndoială, marele interes de care s-a bucurat contribuţia lui Einstein, dar, în ultimele decenii, succesul s-a transformat în blestem. În cercurile largi ale fizicienilor, opinia predominantă pare să fie aceea că relativitatea generală este deja deplin înţeleasă şi complet verificată. Uneori, acest argument e folosit pentru a justifica tăierea fondurilor de cercetare în domeniu. Totuşi, o verificare completă e teoriei nu este niciodată cu putinţă, aşa încât, fie şi doar pentru acest motiv, nu trebuie să renunţăm la noi experimente care ne-ar putea oferi comparaţii independente ale teoriei cu observaţiile, mai cu seamă în cazul unor idei atât le importante ca acelea din teoria relativităţii generale. Un set de experimente care testează o teorie nu poate acoperi decât un spectru limitat de fenomene. Chiar dacă sunt confirmate pană la un punct, nu putem fi siguri că teoriile descriu corect toate procesele cărora, în principiu, li se aplică. Aşa cum, vreme îndelungată, teoria lui Newton a fost în acord cu observaţiile, până când a fost recunoscută ca un caz particular al relativităţii generale, cu un domeniu limitat de valabilitate, şi relativitatea generală ar putea fi cazul-limită al unei teorii încă necunoscute. Nici măcar în plan pur teoretic relativitatea nu e pe deplin înţeleasă – numeroase întrebări, importante mai ales pentru cosmologie, au rămas fără răspuns. Există tot mai

multe dovezi că relativitatea generală trebuie extinsă.

La majoritatea teoriilor din fizică se ajunge după un proces îndelungat şi dificil, pornind de la o idee creatoare sau de la o observaţie care nu poate fi explicată. O idee poate fi urmată pentru că pare atrăgătoare din perspectivă estetică sau matematică; un rezultat experimental neexplicat ne poate obliga să modificăm teoriile curente pentru a le pune de acord cu noile observaţii. Acest proces poate dura decenii şi poate da de lucru unui număr mare de fizicieni teoreticieni şi experimentatori. Multe teorii aflate actualmente în centrul atenţiei, cum sunt cele din fizica particulelor elementare sau gravitaţia cuantică, sunt supuse în continuare acestui proces. Dezvoltarea mecanicii cuantice a urmat acelaşi curs vreme îndelungată, până când a căpătat forma acceptată în prezent. (Chiar şi în legătură cu ea, multe întrebări fundamentale au rămas fără răspuns, dar, din perspectiva aplicaţiilor ei, se poate spune că e înţeleasă.) Rezultatul final, aşa cum intră mai târziu în manuale, se întâmplă deseori să nu semene cu primele formulări – unele contribuţii istorice se dovedesc a fi neimportante, prea complicate sau pur şi simplu greşite. Pentru teoriile în curs de formare, nu-i limpede dacă vor fi vreodată încorporate în ştiinţa noastră; ramuri întregi ale fizicii au ajuns în impas, dar cercetătorii au tras din ele învăţăminte utile în altă parte.

Situaţia a fost cu totul diferită atunci când Einstein a creat relativitatea generală. El singur, susţinut doar de câţiva prieteni, între care Marcel Grossmann, şi oarecum în competiţie cu matematicianul David Hilbert, a înfăptuit esenţialul. Nu toate contribuţiile au urmat o cale directă pas cu pas, iar unele dintre articolele publicate s-au dovedit sterile. Totuşi, în timp relativ scurt, el şi-a încheiat opera, care a fost curând confirmată de observaţii. Ne-am putea închipui că Einstein şi-a conceput de la bun

început teoria în forma perfectă, fără să aibă nevoie s-o îmbunătăţească – impresie care explică de ce unii fizicieni consideră că relativitatea generală nu mai merită cercetată.[11]

În realitate, lucrurile stau altfel. Doar cele mai simple soluţii ale relativităţii generale sunt înţelese, ceea ce, din fericire, e de-ajuns pentru multe probleme din fizică. Chiar şi soluţiile cele mai simple şi mai simetrice conduc la descoperiri importante în cosmologie, dar, de îndată ce complexitatea creşte puţin, întâmpinăm dificultăţi imense. Ecuaţiile teoriei nu permit aplicarea procedeelor standard – fiecare situaţie trebuie analizată diferit, şi doar în puţine cazuri putem găsi soluţii exacte. Uneori calculatorul ne poate fi de folos, dar nici atunci ecuaţiile nu sunt uşor de analizat. De aceea, mulţi matematicieni sunt interesaţi de anumite probleme ale relativităţii generale şi contribuie la înţelegerea ei. Există şi întrebări fără răspuns, cum e cea legată de predictibilitate (vezi capitolul 6), care pun în discuţie înseşi fundamentele fizicii.

O analiză numerică a ecuaţiilor lui Einstein – ultima speranţă când rezolvarea matematică directă se dovedeşte a fi prea complicată – e extrem de dificilă. Cercetarea numerică a început în anii ’70 şi s-a dezvoltat mult în anii ’90 ai secolului trecut. De un interes aparte s-au bucurat ciocnirile dintre stele masive sau dintre găuri negre, pentru că era de aşteptat ca acestea să fie surse puternice ale unui tip de semnal cu totul nou; undele gravitaţionale. Relativitatea generală prezice că spaţiul-timp însuşi poate vibra – ondulaţii periodice se propagă sub forma unor unde, la fel ca valurile pe mare. Ne punem speranţa că acestea vor fi detectate în anii următori, ceea ce nu numai că ar constitui o testare a relativităţii generale, ci ar deschide şi o nouă ramură în astronomie. Am putea începe să explorăm cosmosul nu doar cu ajutorul luminii sau

al altor forme de radiaţie electromagnetică, ci şi cu ajutorul undelor gravitaţionale.

Ca să detectăm undele gravitaţionale – şi orice nou semnal – trebuie să ştim ce anume căutăm: trebuie să cunoaştem intensitatea undei gravitaţionale, care se modifică în timp ce călătoreşte spre noi, la fel ca undele de pe suprafaţa apei, din momentul când a fost creată într-o ciocnire. Ecuaţiile matematice sunt însă prea complicate pentru o rezolvare directă, iar nici calculatoarele nu s-au dovedit de mare folos. Abia recent, după activitatea intensă de cercetare a unor grupuri (mult mai puţin numeroase decât cele angajate în fizica particulelor sau în fizica materiei condensate), a apărut o descoperire importantă. Frans Pretorius a arătat în 2005 că programe de calculator stabile pot oferi acum rezultate valoroase privind ciocnirile dintre obiecte grele – un semn încurajator tocmai când erau în construcţie detectori de unde gravitaţionale precum LIGO, un set de detectori în statele Louisiana şi Washington, GEO600 în Germania, Virgo în Italia şi TAMA în Japonia.

Dar să ne întoarcem la elaborarea relativităţii generale. Einstein nu lucra cu totul independent de observaţii, însă existau puţine indicaţii care să-l călăuzească în extinderea legii lui Newton. Apăreau doar foarte uşoare abateri ale traiectoriilor unor planete. Urbain Le Verrier descoperise în 1855 că rotaţia orbitei lui Mercur diferea de predicţiile teoriei newtoniene cu 43 de secunde de arc (aproximativ o sutime de grad) pe secol. Fuseseră luate în calcul influenţa lui Venus, planeta cea mai apropiată de Mercur, şi micile perturbaţii provocate de neregularităţile formei Soarelui, fără ca observaţiile să poată fi puse de acord cu teoria. Numai Einstein a putut explica această abatere, folosind noile ecuaţii de mişcare ale relativităţii generate.

Curând au apărut noi date incompatibile cu legea lui Newton, dar care fuseseră deja prezise corect de Einstein: curbări infime ale razelor de lumină provenind de la o stea, la trecerea acestora în apropierea Soarelui. Ele au fost măsurate de Arthur Eddington în timpul eclipsei solare totale din 1919, ceea ce a reprezentat prima confirmare spectaculoasă a relativităţii generale. (în 1976, Edward Fomalont şi Richard Sramek au efectuat măsurători mai precise de acelaşi tip, folosind undele radio emise de cuasari.) Dacă predicţiile lui Einstein n-ar fi fost în acord cu observaţiile, teoria lui ar fi fost de mult uitată, în ciuda replicii sale ironice: „Dacă natura nu e în acord cu teoria, cu atât mai rău pentru natură."

În 1960, Robert Pound şi Glen Rebka au testat pentru prima oară relativitatea generală pe Pământ măsurând modificarea timpului la diferite altitudini, ceea ce presupune poziţii diferite în spaţiu-timp. Departe de centrul Pământului, forţa gravitaţională e mai slabă, ceea ce implică, după cum vom vedea, schimbarea formei spaţiului-timp. Timpul se scurge mai repede la altitudini mai mari, fenomen care nu poate fi pus însă în evidenţă decât prin măsurători foarte fine. În acest scop, Pound şi Kebka au exploatat efectul Mössbauer, folosind cristale care emit şi absorb lumină de frecvenţă bine determinată. Atomii emit şi absorb lumină în jurul anumitor frecvenţe din aşa-numitul spectru, ceea ce se explică prin natura cuantică a materiei (subiectul următorului capitol). Dacă măsurătorile se fac asupra atomilor dintr-un gaz, procesele de emisie şi absorbţie au loc în diferite stări de mişcare, deoarece căldura îi face pe atomi să se mişte. Cum, conform relativităţii speciale, scurgerea timpului, deci şi frecvenţa (numărul de oscilaţii în unitatea de timp), depinde de viteza atomului, frecvenţele luminii emise şi absorbite nu iau valori precise, ci sunt cuprinse în intervale de lărgime finită.

În cazul efectului Mössbauer, emisia şi absorbţia au loc nu la nivelul atomului, ci la cel al întregului cristal, care se deplasează mult mai puţin decât atomii dintr-un gaz. Prin urmare, frecvenţele de emisie şi absorbţie sunt mult mai precis determinate, iar relativitatea specială nu mai produce deplasări în frecvenţă. Dacă însă un cristal care emite lumină şi altul, de acelaşi tip, care o absoarbe se află la altitudini diferite, intră în joc relativitatea generală. Timpul se scurge diferit pentru cele două cristale, făcând ca frecvenţa de emisie să nu coincidă cu cea de absorbţie – fenomen care poate fi pus în evidenţă nu numai prin diferenţe mari de altitudine: e de ajuns înălţimea unui bloc de câteva etaje.

Acelaşi efect relativist, folosind orologiile atomice de mare precizie, iar nu efectul Mössbauer, a fost observat în 1971 de J.C. Hafele şi Richard Keating comparând scurgerea timpului pe Pământ şi în avioane care zboară la mare altitudine. În acest caz, intră în joc şi relativitatea specială (prin viteza avioanelor), şi relativitatea generală (prin altitudinea de zbor, adică poziţia lor în câmpul gravitaţional). În ciuda acestui experiment încununat de succes, nu toată lumea a fost convinsă de importanţa efectelor relativităţii generale. Pe 23 iunie 1977, a fost lansat satelitul NTS-2, primul care avea la bord un orologiu atomic pentru scopuri experimentale. Orologiul a fost construit făcându-se corecţia corespunzând relativităţii speciale, dar fără să se ţină cont de relativitatea generală. După douăzeci de zile petrecute în spaţiu, semnalele primite arătau o abatere a ritmului orologiului din satelit faţă de ritmul celor de pe Pământ, exact aşa cum prevedea relativitatea generală.

Pesemne că cea mai spectaculoasă confirmare a relativităţii generale a fost obţinută prin observarea pulsarilor dubli. Aceştia sunt sisteme de două stele apropiate care se rotesc una în jurul celeilalte, una

dintre ele (pulsarul) emiţând radiaţie la intervale regulate. În funcţie de poziţia pulsarului în sistemul dublu, semnalele suferă o întârziere diferită, fiindcă parcurg drumuri diferite pentru a ajunge la noi. Orbita şi eventualele modificări ale razei sistemului pot fi deci determinate cu mare precizie. Conform relativităţii generale, procesul de rotaţie face să fie emise unde gravitaţionale, şi sistemul pierde energie. Pierderea de energie face ca stelele să se apropie, ceea ce poate fi observat măsurând cu precizie orbita. Această pierdere de energie e maximă atunci când distanţa dintre stele e minimă – fiecare din stele pătrunde mai adânc în câmpul gravitaţional al partenerei, iar efectele relativităţii generale sunt mai puternice.

În 1974, Joseph Taylor şi Russell Hulse au identificat un pulsar dublu constituit din două stele neutronice cu raza de 20 km, având o perioadă de rotaţie de numai 8 ore.[12] Distanţa minimă dintre stele este de doar 700.000 km, aproximativ raza Soarelui. Atesta e un sistem ideal pentru a testa modificarea orbitei, şi, întradevăr, observaţiile efectuate până în prezent confirmă predicţiile relativităţii generale. (Orbita sistemului e, de asemenea rotită, ca aceea a lui Mercur, dar mult mai rapid, cu 4 grade pe an, iar de aici se poate estima masa stelelor neutronice.)

Pe 20 aprilie 2004 a fost lansat satelitul Gravity Probe B, care a colectat date timp de şaisprezece luni. Ideea acestei misiuni apăruse încă din 1959, dar tehnologia a fost pusă la punct abia prin eforturile lui Francis Everitt. Efectul vizat – o „zgâlţâire” a spaţiului-timp în vecinătatea Pământului aflat în rotaţie – necesita giroscoape extrem de precise. Pentru a evita perturbaţiile induse de o formă neregulată, care ar fi împiedicat măsurarea unui efect atât de fin, giroscoapele trebuiau să conţină sferele cele mai aproape de perfecţiune din câte s-au construit vreodată – aşa cum nici măcar în univers nu se prea întâlnesc:

doar unele stele neutronice dense sunt sfere mai netede. Dacă aceste sfere ar fi mărite până la dimensiunea Pământului, cel mai înalt munte ar avea 4 metri. Primele rezultate au fost anunţate la începutul lui 2007, iar ele au confirmat încă o dată relativitatea generală.

Spaţiul-timp curb:
O scenă care se zguduie sub greutatea actorilor

Sunt momente când marele univers,
Ca pânza vopsită de-un meşter nedibaci,
Se strânge-ntr-o nimica toată, şi poate că
Momentu' acela a sosit! Să fie dar' acum.

Oscar Wilde, *Tragedie florentină*

În relativitatea generală, forma spaţiului-timp e determinată de materia pe care acesta o conţine. Aici îşi află forţa gravitaţională originea, intim legată de structura spaţiului şi timpului, aşa cum nu se întâmplă cu celelalte forţe din fizică. Matematic, aceasta se exprimă printr-un spaţiu-timp curb, un spaţiu-timp pentru care transformarea între spaţiu şi timp, în sens relativist, depinde nu doar de mişcarea observatorului, ci şi de poziţia lui în spaţiu şi timp – iar astfel conceptele relativităţii speciale sunt generalizate. Teoria nu se mai limitează la ce văd observatorii care se deplasează în linie dreaptă, cu viteze diferite, dar constante. Această presupunere a fost o simplificare folosită în relativitatea specială pentru a înţelege efectele diferitelor viteze, dar nu e realistă: când facem observaţii ne deplasăm pe traiectorii complicate în spaţiu şi timp. Chiar dacă stăm aproape nemişcaţi în laborator, laboratorul se află pe Pământ, care se învârte în jurul axei sale şi se roteşte în jurul Soarelui. La rândul lui, Soarele se deplasează prin Calea-Lactee. O teorie generală trebuie să poată descrie observatori care se mişcă de-a lungul unor curbe arbitrare, fiind acceleraţi atunci când asupra

lor acţionează forţe. Relativitatea generală îndeplineşte această condiţie permiţând transformări ale spaţiului şi timpului ce depind de poziţie, şi dând astfel spaţiului-timp o formă curbă.

Cel mai simplu exemplu de spaţiu curb e suprafaţa bidimensională a unei mingi – o sferă. E o suprafaţă curbă, dar şi închisă în sine, ceea ce nu e valabil pentru toate spaţiile curbe. Sfera ilustrează faptul că, privite din spaţiul înconjurător, liniile de pe suprafaţa ei trebuie să fie curbe pentru a rămâne pe suprafaţă. Orice linie dreaptă care porneşte de pe ea părăseşte imediat suprafaţa. Acest comportament e o consecinţă generală a curburii, dar spaţiile curbe abstracte nu au nevoie de un spaţiu înconjurător cum e cel tridimensional din jurul sferei. De pildă, spaţiul-timp însuşi e cvadridimensional şi ar avea nevoie de un spaţiu de fond cu şi mai multe dimensiuni. Toate consecinţele curburii pot fi descrise matematic fără a ne raporta la asemenea spaţii înconjurătoare – fapt exploatat de Einstein în formularea relativităţii generale în cadrul geometriei diferenţiale, care s-a dezvoltat în secolul al XIX-lea prin cercetările lui Bernhard Riemam).

Revenind la exemplul sferei într-un spaţiu de fond tridimensional, vedem o altă consecinţă importantă a curburii. Când ne deplasăm pe o sferă, aşa cum facem mereu pe suprafaţa Pământului, privind din spaţiul de fond, suntem obligaţi să ne rotim. De regulă nu observăm acest lucru, fiindcă Pământul e foarte mare şi rareori putem avea această perspectivă din afară, însă rotaţia e uşor de vizualizat pe un glob: capul unui om din Europa e îndreptat în altă direcţie decât capul unui om din America, chiar dacă amândoi stau în poziţie de drepţi.[13] Această rotaţie n-ar apărea dacă ne-am mişca pe o suprafaţă plană, cum e podeaua unei camere, şi e o consecinţă a curburii.

Spaţiul-timp e curbat de materia pe care o conţine şi ar trebui să prezinte efecte comparabile cu cele de pe o sferă, dar ele sunt mai greu de vizualizat, fiindcă, implicând şi timpul, e cvadridimensional. Analogia de mai sus pune în evidenţă cea mai importantă consecinţă, legată direct de forţa gravitaţională. Din relativitatea specială ştim că transformabilitatea spaţiului şi timpului corespunde trecerii de la o viteză la alta, aşa cum transformabilitatea celor trei dimensiuni spaţiale corespunde trecerii de la un unghi la altul. După cum o suprafaţă curbă implică o rotaţie atunci când ne deplasăm, deplasarea într-un spaţiu-timp curb implică o modificare a vitezei, deci o acceleraţie, iar acceleraţiile sunt întotdeauna provocate de forţe. Curbura spaţiului-timp presupune deci acţiunea unei forţe, care, conform relativităţii generale, este tocmai gravitaţia.

Prin acest procedeu uimitor, Einstein a reuşit să extindă teoria lui Newton şi să înlăture neajunsul ei. În gravitaţia lui Einstein nu există interacţiuni fantomatice directe între obiecte aflate la distanţă unele faţă de altele. Încorporând spaţiul şi timpul într-un obiect dinamic, a cărui structură e supusă legilor fizicii – iar nu considerându-le, ca Newton, o scenă rigidă, neschimbătoare această acţiune la distanţă a fost eliminată din fizică. Masele fac ca regiunea spaţio-temporală din jurul lor să se curbeze, iar alte mase resimt o forţă gravitaţională ca rezultat al curburii. Faptul că aceasta nu constituie o acţiune la distanţă poate fi văzut atunci când prima masă se deplasează, făcând astfel ca forţa gravitaţională cu care acţionează asupra celorlalte mase să se modifice. După cum se arată în relativitatea generală, această modificare nu se petrece instantaneu: modificarea curburii se propagă în spaţiu-timp până ajunge la mase aflate la distanţă. Interacţiunile fizice au loc numai local, teoria e aşezată pe baze solide, iar dificultatea cu care se confrunta Newton e înlăturată. Dar poate

că cea mai spectaculoasă consecinţă a unui spaţiu-timp curb apare în cosmologie, unde relativitatea generală determină evoluţia în timp a universului însuşi.

Graniţele spaţiului şi timpului:
Sfârşitul unei teorii

Feriţi-vă să cereţi timp;
soarta potrivnică nu vi-l acordă niciodată.

Mirabeau

Schimbarea de statut a spaţiului-timp de la o simplă scenă, pe care au loc transformările materiei, la un obiect fizic a constituit o revoluţie (figura 2). Relaţia reciprocă – materia curbează spaţiul, iar propria ei mişcare e influenţată de curbură – conduce la dificultăţi matematice fără precedent, care îi pun în încurcătură nu doar pe fizicieni, ci şi pe matematicieni. Din fericire, teoria e suficient de bine înţeleasă pentru a dezvălui multe aspecte ale comportamentului sistemelor fizice, şi în special ale comportamentului universului. Rolul spaţiului şi timpului, privit acum ca obiect fizic, poate fi comparat cu situaţia dintr-un roman în care unul dintre personaje este cartea însăşi. Un asemenea roman ar conduce în direcţii surprinzătoare, greu de închipuit. Independent însă de imaginaţia noastră, consecinţele rolului fizic al spaţiului-timp pot fi deduse pe cale matematică. După cum vom vedea, ele sunt mai grave decât ar părea după exemplul romanului.

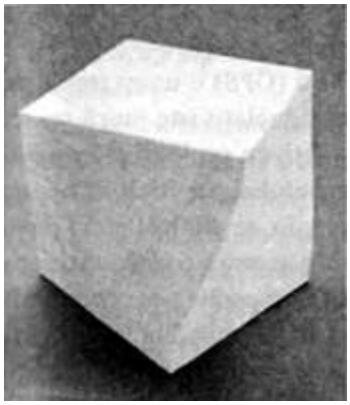


Figura 2. *Obiectele se deplasează de-a lungul traiectoriilor în spaţiu-timp, dar spaţiul-timp însuşi se modifică.* (Orbita Orbită, *2007. Sculptură şi fotografie: Gianni Caravaggio.)*

Înainte de a intra în capitolul întunecat al aşa-numitelor singularităţi, vom mai arunca o privire asupra relaţiei dintre gravitaţie şi transformabilitatea spaţiului şi timpului. Separarea dintre spaţiu şi timp e influenţată nu doar de viteză, ci şi de gravitaţie. De pildă, timpul se scurge mai repede la altitudini mai mari, unde distanţa faţă de centrul Pământului e mai mare.[14] Şi aceste modificări sunt de regulă imperceptibile, însă au căpătat deja relevanţă în tehnologie. La cele mai precise orologii atomice apare o schimbare a ritmului când sunt ridicate fie şi cu zece metri! După cum am spus, trebuie să se ţină cont de aceste efecte, în plus faţă de cele datorate vitezei, atunci când relativitatea e testată prin orologii atomice plasate la bordul avioanelor. (În acest caz, efectul gravitaţional e încă mai mare decât cel al vitezei, cele două acţionând în sensuri opuse: la viteze mari ceasornicele încetinesc, dar în experimente, pentru valorile tipice ale altitudinilor şi vitezelor avioanelor, ceasornicele merg mai repede ca rezultat al gravitaţiei.)

Sistemul de poziţionare globală (GPS) e un exemplu de tehnologie aplicată în care efectele relativiste joacă un rol crucial: douăzeci şi patru de sateliţi, cu orologii atomice la bord, sunt distribuiţi

în jurul Pământului, aşa încât în fiecare loc de pe Pământ deasupra orizontului se află cel puţin patru sateliţi; aceştia trimit regulat semnale în care e codificată poziţia lor şi timpul măsurat de orologiu. Compararea semnalelor de la mai mulţi sateliţi într-un punct de pe suprafaţa Pământului permite calcularea poziţiei cu o precizie de cinci până la zece centimetri![15]

Dacă în calculul timpului de propagare a semnalelor GPS am ignora relativitatea, măsurătorile ar fi imposibile. După numai două minute ar apărea erori ale măsurătorilor de poziţie, iar după o zi abaterea de la valorile corecte ar fi de zece kilometri. Relativitatea joacă în acest sistem un rol esenţial, care multă vreme n-a fost pe deplin înţeles. Primii sateliţi GPS au fost lansaţi în 1978, dar în 1979, 1985 şi 1995 – anul inaugurării oficiale a sistemului – s-au organizat în continuare conferinţe cu scopul de a înţelege mai bine acest rol. Totuşi, în 1996 a fost publicat un raport tehnic eronat. Dificultăţile ţineau de sincronizarea şi compararea orologiilor de pe sateliţi, dar şi de posibila influenţă a gravitaţiei Soarelui, a cărei intensitate e uşor diferită în zona de pe Pământ unde e zi faţă de cea din zona unde e noapte, datorită distanţei diferite până la Soare. Această din urmă problemă s-a dovedit irelevantă, dată fiind precizia actuală a orologiilor. (Precizia e însă foarte ridicată. Orologiile cu rubidiu au o eroare de o jumătate de nanosecundă la zece zile.) Variaţiile câmpului gravitaţional de-a lungul Pământului, şi mai ales abaterea suprafeţei sale de la forma perfect sferică, influenţează puternic timpul măsurat de orologii. Ne-am putea întreba dacă efectele dominante sunt cele ale relativităţii speciale sau cele ale relativităţii generale. La altitudinea sateliţilor GPS, aproximativ 27.500 km, relativitatea generală iese învingătoare.

Deşi efectele relativităţii nu sunt sesizabile în experienţa noastră curentă, la scară cosmică ele

devin uriaşe. Timpul nu mai e rigid, ca la Newton, ci este influenţat de materia din univers. În situaţii extreme, de aici poate rezulta, conform relativităţii generale, că timpul însuşi ajunge la capăt. Influenţa materiei asupra spaţiului-timp este atunci atât de puternică, încât timpul se opreşte sau spaţiul atinge o limită de nedepăşit. Aceasta se presupune că s-a întâmplat la big bang (când derulăm în sens invers evoluţia universului) sau în găurile negre, unde forţa gravitaţională devine atât de mare, încât distanţele spaţiale şi temporale scad şi mai mult şi, în cele din urmă, se anulează complet. Fără separări temporale între evenimente, timpul însuşi trebuie să dispară, iar odată cu el tot ce se întâmplă. Această concluzie teribilă se aplică tuturor corpurilor materiale şi universului însuşi: nimic nu poate trece dincolo de un asemenea punct, numit singularitate.

Ce anume s-ar întâmpla de fapt la o singularitate? Pentru a înţelege asta, ar trebui să studiem ecuaţiile matematice ale relativităţii generale, căci ele descriu structura spaţiului şi timpului. Ţinând cont de forma continuă a spaţiului-timp, reprezentată matematic de geometria diferenţială, acestea sunt *ecuaţii diferenţiale.* Altfel spus, ecuaţia lui Einstein determină felul în care se comportă forma spaţiului-timp ţinând cont de materia prezentă sau, mai exact, de densitatea de energie şi de presiune. Astfel, ecuaţiile corespund unei reprezentări continue, în care spaţiul-timp e vizualizat ca un cearşaf curbat şi încreţit, dar un cearşaf cvadridimensional. Spre deosebire de orice ţesătură din realitate, între ale cărei fire sunt goluri, cearşaful relativităţii generale n-are nicio structură, chiar dacă privim la o scară a distanţelor oricât de mică – deci pot fi folosite ecuaţiile diferenţiale, care descriu modificările spaţiului-timp la cele mai mici deplasări ale poziţiei pe el. Aceste modificări nu sunt la scară atomică, ci la o scară mai mică

decât orice dimensiune imaginabilă; ele apar în procesul matematic de trecere la limită prin care e conceptualizată reprezentarea continuă.

O ecuaţie diferenţială poate fi vizualizată prin câmpul ei de viteze – în fiecare punct se află o săgeată care indică direcţia şi rata de variaţie. În relativitatea generală, fundalul câmpului în cazurile cele mai simple este un plan ale cărui puncte determină, prin cele două coordonate, timpul şi expansiunea universului la acel timp. O soluţie a ecuaţiei diferenţiale este o curbă în plan care urmează în fiecare punct direcţia săgeţii vitezei. Putem reprezenta grafic soluţiile, ca în figura 3, dar există şi metode matematice de a le reprezenta direct sub forma unei funcţii, sau tehnici numerice de a găsi asemenea curbe cu ajutorul calculatoarelor.

După cum se vede din figură, câmpul vitezelor nu e de ajuns pentru a determina o soluţie unică – el nu ne indică decât direcţia de deplasare în fiecare punct. Înainte de toate, trebuie să ştim de unde pornim: trebuie ales un punct, condiţia iniţială. Odată ce l-am ales, în majoritatea cazurilor obţinem o soluţie unică, dar, în funcţie de problema analizată, condiţiile iniţiale pot lua forme mai complicate decât un singur punct.

În cosmologie, câmpul de viteze al expansiunii cosmice e determinat de materia din univers. Mici modificări ale spaţiului-timp provocate de deplasări infime ale poziţiei sunt date de densitatea de energie şi presiunea materiei din jur.

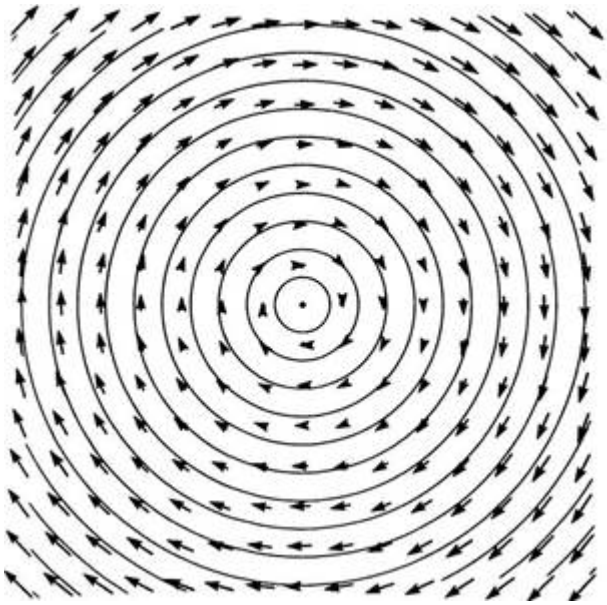


Figura 3. *Majoritatea sistemelor fizice sunt tratate matematic specificând în fiecare punct ratele de variaţie, formulate ca ecuaţii diferenţiale. Ratele de variaţie pot fi reprezentate grafic prin săgeţi, aşa încât soluţia problemei este curba care urmează mereu direcţia săgeţilor. În acest exemplu e prezentat câmpul de viteze al unui vârtej, iar soluţiile sunt cercuri în jurul punctului central.*

Drept condiţie iniţială putem alege o stare semănând cu cea pe care o vedem acum în univers, o configuraţie matematică în care spaţiul se extinde şi materia se diluează. Aceasta deschide mai multe posibilităţi pentru evoluţia viitoare. În cazul în care cantitatea de materie din univers e mai mică decât o anumită densitate critică, universul se va extinde veşnic şi va deveni tot mai diluat. Dacă însă cantitatea de materie depăşeşte densitatea critică, în viitorul îndepărtat forţa gravitaţională va opri expansiunea universului, pentru ca apoi să-l facă să se prăbuşească în sine însuşi – va exista deci un punct de întoarcere, ca atunci când arunci o piatră în sus. Pentru a afla soarta universului, trebuie să cunoaştem cu precizie cantitatea de materie din el – sarcină nu tocmai uşoară. Putem face o estimare adunând masele tuturor stelelor şi masa hidrogenului gazos dintre galaxii, dar, după cum vom vedea mai

târziu, există şi alte forme de materie şi energie mai greu de cuantificat. Nu cunoaştem originea acestora, însă observaţiile arată că densitatea totală de energie e foarte apropiată de cea critică. Prin urmare, nu putem şti dacă universul se va extinde veşnic sau dacă va colapsa într-o bună zi.

Viitorul fiind incert, nu ne rămâne decât să cercetăm ce s-a întâmplat în trecut. Ţinând cont de expansiune, universul a fost mai mic decât este în prezent, iar cu foarte mult timp în urmă a fost mai fierbinte decât orice materie de pe Pământ sau chiar din stele. Comportamentul materiei în asemenea condiţii extreme e puţin cunoscut, însă acesta influenţează în mică măsură evoluţia generală a universului. Analiza ecuaţiilor lui Einstein arată că unele distanţe de tip spaţial sau temporal trebuie să fie neverosimil de mici la momentul big bang-ului (sau în găurile negre). Putem vedea acest lucru în câmpul vitezelor din figura 4, care împinge fiecare curbă a soluţiilor spre un punct de volum nul. Densitatea de energie a materiei – raportul dintre energia totală şi volumul ocupat – devine infinită, prin împărţire la zero. Ajungem astfel la o dilemă de ordin fizic: nicio materie nu poate avea densitate infinită. Apoi, această divergenţă face ca, din punct de vedere matematic, ecuaţiile lui Einstein să-şi piardă valabilitatea. Chiar dacă am încerca să ignorăm problema densităţii infinite, ecuaţiile ne-ar spune că forma spaţiului-timp variază cu o cantitate infinită la cea mai mică schimbare în poziţie (sau în timp). Aceasta nu poate fi o structură coerentă: spaţiul-timp se rupe în punctul singularităţii.

Singularităţile reprezintă o dificultate gravă, un neajuns teoretic care ne va obliga în cele din urmă să renunţăm la relativitatea generală ca descriere fundamentală, sau s-o extindem. Din faptul că spaţiul şi timpul îşi ating limitele în această teorie nu putem deduce că, din punct de vedere fizic,

există un început sau un sfârşit al lumii. Deşi ecuaţiile matematice arată că se ajunge la un punct în care toate distanţele se anulează, ecuaţiile însele îşi pierd atunci semnificaţia – teoria nu mai e valabilă în acest punct, nu se mai pot face predicţii pe baza ei. Ea ne conduce până la marginea prăpastiei, dar apoi ne lasă singuri să ne întrebăm ce se află dincolo. De aici încolo trebuie să căutăm o altă călăuză.

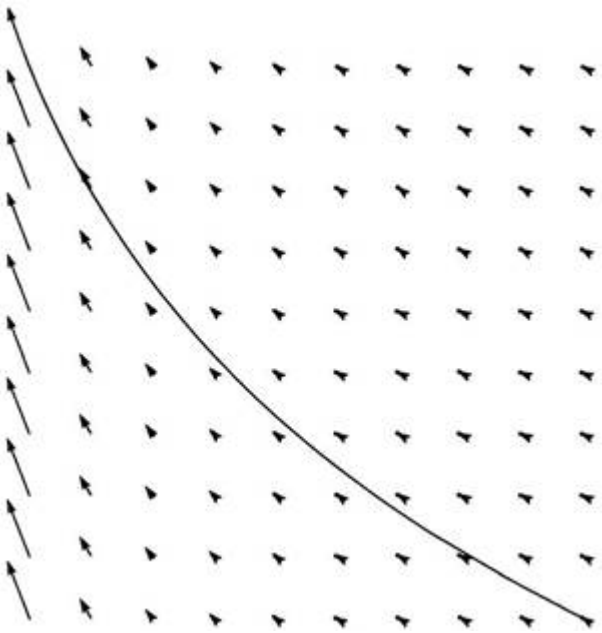


Figura 4. *Ecuaţia diferenţială a cosmologiei e prezentată aici prin câmpul vitezelor, aşa cum rezultă din ecuaţia lui Einstein. Pe orizontală reprezentat volumul universului, iar pe verticală densitatea de materie. Pe măsură ce ne apropiem de marginea din stânga, unde volumul universului se anulează, săgeţile devin mai lungi. Fiecare curbă care e soluţia ecuaţiilor este atrasă inevitabil spre margine. În plus, densitatea de materie creşte nelimitat, devenind infinită pentru volumul nul de la marginea din stânga.*

La fel ca teoria lui Newton, şi teoria gravitaţională a lui Einstein e subminată de neajunsuri, dar într-un mod mult mai grav. Dacă Newton nu putea accepta tendinţele „animalice” ale teoriei lui, umbra ce planează asupra relativităţii generale e mult mai ameninţătoare. Fizicianul John Wheeler spunea că relativitatea

generală poartă în sine germenii propriei sale distrugeri – ceea ce ne aduce aminte de cuvintele lui Nietzsche: „Toate lucrurile mari pier prin ele însele, printr-un act de autosuprimare.”[16] Într-adevăr, relativitatea generală e unică nu doar prin forţa ei, ci şi pentru că ne arată limpede limitele ei. Acest tip de singularităţi nu mai apar nicăieri în fizică, fiindcă deocamdată numai relativitatea generală a abordat direct comportamentul spaţiului şi timpului. Fiind o barieră atât de puternică, problema singularităţii a atras interesul celor care au încercat s-o depăşească prin crearea unor teorii mai cuprinzătoare. În comparaţia făcută cu un roman, cartea nu numai că e un personaj al lui, dar, în plus, va pieri în cursul acţiunii.[17]

Teoriile sinucigaşe sunt foarte rare în fizică, aşa încât nu e de mirare că adesea consecinţele lor sunt greşit interpretate.[18] Până şi Einstein a crezut că limitele spaţiului şi timpului datorate singularităţilor apar doar în cazuri particulare, şi nu în situaţii generale. Pe vremea lui, o asemenea idee nu părea complet nerealistă, fiindcă nu se cunoşteau prea multe despre diversele soluţii matematice ale relativităţii generale. (Dar Einstein a încercat zadarnic să demonstreze irelevanţa singularităţilor.) Abia în anii ’60, odată cu cercetările lui Stephen Hawking, Roger Penrose şi ale altora, a devenit limpede că limitele spaţiului-timp nu pot fi evitate în cadrul relativităţii generale şi că trebuie luate în serios.[19] Soluţiile matematice care satisfac doar condiţia de a fi compatibile cu forma actuală a universului au cel puţin o singularitate – o limită a spaţiului şi timpului – unde relativitatea generală însăşi îşi pierde valabilitatea.

Absenţa respingerii:
Pericolul de a fi prea atrăgător

> Am văzut aceasta la cel mai simplu dintre fenomenele naturale: gravitaţia, care nu încetează să tindă şi să preseze către un centru lipsit de întindere, a cărui atingere ar însemna distrugerea ei şi a materiei; ea nu conteneşte, chiar dacă întregul univers ar fi strâns la un loc.
>
> Arthur Schopenhauer,
> *Lumea ca voinţă şi reprezentare*[20]

Deşi conduce la o singularitate, fenomenul colapsului gravitaţional are origine fizică. La fel ca în teoria lui Newton, forţa din legea einsteiniană a gravitaţiei este întotdeauna atractivă, şi avem nevoie de alte tipuri de forţe care să i se opună şi să conducă la situaţii stabile. (În relativitatea generală, există posibilitatea unei respingeri, ca rezultat al unei puternice presiuni negative, după cum vom vedea mai târziu. Dar aceste forţe nu pot fi suficient de mari pentru a compensa atracţia şi a împiedica apariţia singularităţilor.) Pentru a înota sau a zbura la altitudine constantă, avem nevoie de forţe arhimedice sau de forţe de portanţă. Pentru a sta ferm pe Pământ şi a învinge atracţia spre centrul lui, gravitaţia trebuie echilibrată de forţele solului. Pământul însuşi nu colapsează fiindcă e alcătuit din materie solidă (sau lichidă, în miezul lui). Dacă Pământul ar fi mai greu, presiunea lui internă şi temperatura ar creşte, ceea ce ar conduce la o topire şi evaporare parţială, aşa cum se întâmplă cu planete gazoase precum Jupiter şi Saturn. La presiuni înalte, forţele de respingere dintre atomii de gaz sunt suficient de puternice pentru a contrabalansa gravitaţia. Dacă asemenea

planete gigantice ar fi şi mai masive, presiunea gravitaţională ar creşte, iar pe măsură ce ele ar deveni tot mai comprimate densitatea tot mai mare ar apropia la un moment dat atomii de hidrogen suficient de mult pentru ca ei să fuzioneze în atomi de heliu. Planetele ar deveni atunci stele, care, prin procesul de fuziune, produc destulă energie nu doar pentru a străluci, ci şi pentru a contrabalansa gravitaţia prin căldura internă.

Pentru mase şi mai mari, presiunea termică nu va mai fi de ajuns. În primă instanţă, există o forţă de origine cuantică ce ar veni în ajutorul materiei, aşa cum se întâmplă în stelele pitice albe. Aceasta se întâmplă pentru că nu putem comprima un gaz de electroni dincolo de o anume densitate, chiar dacă respingerea electrică ar fi neutralizată de protonii încărcaţi pozitiv din materia stelară. Însă, dacă masa totală creşte şi mai mult, forţa aceasta îşi atinge limitele, pentru că electronii încep să reacţioneze cu protonii din nuclee la presiuni înalte. Presiunea gravitaţională continuă să crească, iar de la un punct încolo atomii vor fi atât de comprimaţi, încât protonii din nucleu vor fuziona cu electronii care orbitează în jurul lor, formând neutroni. Rezultă o stea neutronică, cu un miez alcătuit numai din neutroni. O asemenea materie este extrem de densă, pentru că distanţele dintre nuclee şi electroni din materia obişnuită au dispărut; ea poate exista numai în condiţiile unei presiuni gravitaţionale imense, altminteri majoritatea neutronilor s-ar dezintegra imediat la loc în protoni şi electroni. Vom vorbi mai mult despre aceste stele exotice în discuţia privind găurile negre din capitolul 6.

Însă nici această stare extrem de densă nu se poate opune presiunii gravitaţionale atunci când masa devine şi mai mare. De aici încolo, nicio forţă cunoscută nu poate împiedica victoria gravitaţiei în acest război rece al forţelor. Nu se mai poate ajunge la echilibru. Toate fragmentele

de materie nu fac decât să se atragă unele pe altele, şi colapsează într-o gaură neagră, o altă manifestare a singularităţii. În interiorul ei, prăbuşirea nestăvilită a materiei generează densităţi şi temperaturi încă mai mari, iar, apoi, prin influenţa materiei asupra spaţiului şi timpului, timpul însuşi ajunge la sfârşit, odată ce întreaga materiei a fostei stele colapsat. „Ce sfârşit! Ce sfârşit înfiorător!”[21]

Iată deci motivul fizic pentru existenţa singularităţilor în relativitatea generală: natura atractivă a gravitaţiei, fără forţe de respingere puternice. Saltul îndrăzneţ al relativităţii dincolo fizica newtoniană, stimulat de structura schimbătoare a spaţiului-timp, se dovedeşte a fi foarte riscant. Spaţiul-timp devine un obiect dinamic, supus ecuaţiilor matematice. Din nefericire însă, doar în cazuri excepţionale aceste ecuaţii au soluţii care definesc universul în toate momentele de timp. Majoritatea soluţiilor, între care cele realiste, îşi pierd valabilitatea într-un anumit punct, aşa încât spaţiul-timp descris de ele sfârşeşte la rândul lui. Aceste singularităţi există pentru că relativitatea generală, deşi elimină acţiunea la distanţă a lui Newton, nu schimbă natura pur atractivă a legii gravitaţiei. Mai mult, inovaţia cutezătoare a relativităţii generale face ca atracţia materiei să influenţeze chiar spaţiul şi timpul, şi lasă gravitaţia să se dezlănţuie asupra lor, iar ele trebuie să suporte capriciile materiei, fără a fi ferite de o forţă care să împiedice colapsul total. Pentru a rezolva această problemă – care e una fundamentală, şi nu doar de ordin estetic, trebuie să extindem încă o dată teoria şi să facem un salt dincolo de ea.

Există cazuri comparabile în care o teorie conduce la singularităţi, dar acestea pot fi eliminate prin extinderi adecvate. Lichide precum apa, de pildă, pot fi descrise destul de exact presupunând o distribuţie continuă, şi ignorând

faptul că sunt alcătuite din molecule. Această aproximaţie poate fi folosită pentru curgerea printr-o conductă. Dar, pentru debite mici, şi presupunând că la capătul conductei se află un robinet, descrierea nu mai e valabilă: distribuţia continuă se descompune în picături individuale la capătul robinetului. Din perspectiva descrierii continue, această ruptură apare ca o singularitate, fiindcă anumite mărimi, cum e tensiunea superficială, devin divergente în momentul separării, iar ecuaţiile continue îşi pierd sensul. În acest caz, ştim de unde provine dificultatea: când o picătură se separă, nu se întâmplă nimic violent; e de-ajuns să luăm în considerare natura moleculară a materiei, iar dacă tensiunea gravitaţională depăşeşte forţa de coeziune a moleculelor de apă, apa se poate separa în picături. Teoria că apa e continuă trebuie extinsă printr-o teorie mai profundă, care să ţină cont de natura moleculară a materiei. O asemenea teorie e mai realistă, dar mai complicată matematic. Avantajul ei e că nu conduce la singularităţi şi că poate descrie separarea apei în picături.

Există deosebiri mari între cazul gravitaţiei şi cel ai apei, mai ales datorită implicării intime a spaţiului şi timpului în relativitatea generală. Ne aflăm într-o situaţie asemănătoare cu cea în care se afla Einstein înainte să formuleze relativitatea generală: avem o teorie a gravitaţiei care nu intră în contradicţie cu observaţiile; şi totuşi ştim că ea nu poate fi completă, aşa încât trebuie să găsim o extindere a ei, bazată pe principii generale. S-ar părea că nu suntem la fel de norocoşi ca Einstein, care, după ce a înţeles că legea lui Newton era incompatibilă cu transformabilitatea spaţiului şi timpului, printr-un efort intens care a durat un deceniu a propus ca soluţie relativitatea generală. Anumite forme de singularitate au fost găsite în soluţii imediat după 1915, de pildă în soluţia pentru o gaură neagră care nu se roteşte,

determinată de Karl Schwarzschild în 1916. Existenţa generală a singularităţilor în soluţiile relativităţii generale a fost demonstrată în anii ’60. În ciuda numeroaselor eforturi din ultima vreme, nu a fost formulată nicio teorie completă care să păstreze succesele relativităţii generale şi să rezolve problema singularităţilor.

Majoritatea cercetătorilor cred că soluţia se leagă de teoria cuantică, celălalt pilon pe care se sprijină fizica secolului XX. Teoria cuantică operează cu obiecte ondulatorii, extinse în spaţiu, nu cu particule punctiforme. Ea e indispensabilă în descrierea corectă a materiei şi explică fenomene spectaculoase. În astrofizică, după cum am spus, natura cuantică a materiei conduce la noi stări stabile, cum sunt cele din stelele pitice albe sau din stelele neutronice, care se bazează pe forţele cuantice de respingere. Uneori aceste forţe pot echilibra atracţia gravitaţională, ceea ce nu se întâmplă însă pentru mase mari. Privind astfel lucrurile, ţinem cont de natura cuantică a materiei, dar lăsăm deoparte natura cuantică a gravitaţiei şi a spaţiului şi timpului. Dacă am fi ignorat teoria cuantică a materiei, n-ar exista nici măcar stelele pitice albe şi nici stelele neutronice stabile, căci, la densităţile lor, nu apar forţe clasice repulsive. Aceasta ar intra în contradicţie cu observaţiile care ne arată că asemenea obiecte există în cosmos.

În toate aceste consideraţii fizica cuantică a gravitaţiei e ignorată pentru că nu dispunem încă de o asemenea teorie. În plus, cunoştinţele incomplete pe care le avem despre felul în care ar putea fi ca formulată prezintă dificultăţi matematice atât de mari, încât nu se pot aplica la obiecte precum stelele neutronice sau găurile negre. Totuşi, cosmologia ne oferă dovezi solide privind existenţa unor forţe care se opun gravitaţiei şi care ar putea conduce la o teorie fără singularităţi. Astfel, am ajunge să înţelegem ce s-a întâmplat înainte de big bang sau ce se întâmplă în

interiorul găurilor negre. Dar, înainte de a ne ocupa de aceste probleme, trebuie să prezentăm conceptele fundamentale ale teoriei cuantice.

CAPITOLUL 2.
Teoria cuantică.
Stabilitate incertă

> Căci, pe măsură ce îi sclipea şi-i scânteia centura, ba într-o parte, ba într-alta, astfel încât acolo unde la un moment dat era lumină în momentul următor era întuneric, însăşi silueta suferea diverse fluctuaţii, ba era ceva cu un braţ, ba ceva cu un picior, ba cu douăzeci de picioare, ba o pereche de picioare fără cap, ba un cap fără trup, iar aceste părţi care se descompuneau nu alcătuiau niciodată un contur vizibil în bezna adâncă în care se topeau. Şi chiar în timp ce se petrecea acest miracol, vizitatorul era din nou el însuşi, limpede şi desluşit, întotdeauna.
>
> Charles Dickens, *Un colind de Crăciun*[22]

Teoria cuantică se aplică tuturor sistemelor, chiar şi celor macroscopice. Ea e indispensabilă în descrierea corectă a atomilor, domeniu pentru care a fost creată, şi, la fel ca relativitatea generală, a trecut cu succes nenumărate teste. Totuşi, aceste două teorii nu oferă o imagine completă a fizicii, pentru că formulările lor actuale sunt incompatibile, ceea ce capătă o importanţă critică în situaţii extreme, cum e cazul big bang-ului sau al găurilor negre, unde teoria cuantică a gravitaţiei pare să fie ultima speranţă de a învinge singularităţile.

În plus, trebuie să ne confruntăm cu bizareriile teoriei cuantice: de pildă, schimbarea bruscă a stării unui sistem chiar atunci când e măsurat şi

incertitudinea fundamentală care face imposibilă o cunoaştere completă. Funcţia de undă, care conţine întreaga informaţie dintr-un sistem cuantic, „colapsează” brutal în cursul unei măsurători, condamnată de principiul incertitudinii să depună o mărturie incompletă. Merită totuşi să acceptăm această provocare, deoarece teoria cuantică are şi consecinţe salutare – în special în privinţa singularităţilor.

Stabilitatea atomică:
Preţul unei vieţi îndelungate

Conceptual, chiar dacă nu şi istoric, începutul teoriei cuantice e marcat de o problemă a stabilităţii asemănătoare cu cea din gravitaţie. Atomul de hidrogen este alcătuit dintr-un proton cu sarcină electrică pozitivă şi un electron cu sarcină electrică negativă rotindu-se în jurul protonului de masă mai mare. Atracţia electrică face ca electronul să se mişte pe o orbită circulară, aşa cum gravitaţia obligă Luna să se rotească în jurul Pământului. Raza orbitei electronului poate fi considerată raza atomului de hidrogen, iar dimensiunea ei este de aproximativ 50 de miliardimi de milimetru.

Această descriere se confruntă cu o problemă gravă. Conform electromagnetismului lui Maxwell, o sarcină electrică deplasându-se pe o traiectorie care nu e o linie dreaptă trebuie să emită unde. Ca fenomen general, aceasta seamănă cu emisia undelor gravitaţionale de către un pulsar dublu, a cărui rază scade în timp din cauza pierderii de energie; după cum am văzut în capitolul anterior, măsurarea acestei pierderi de energie a însemnat un test important pentru validarea relativităţii generale. În cazul radiaţiei electromagnetice emise de sarcini în mişcare precum electronul, fenomenul analog e mult mai comun; el este deseori exploatat, de pildă la producerea razelor X sau a semnalelor din telefoanele mobile.

Emiterea undelor înseamnă şi că electronul pierde energie în mişcarea lui, nu se mai poate opune atracţiei electrice, prin urmare se apropie de proton. Pierderea de energie, care apare sub forma

luminii vizibile sau a undelor electromagnetice invizibile, poate fi calculată pe baza ecuaţiilor lui Maxwell, şi se dovedeşte că emisia trebuie să aibă loc într-un ritm mult mai rapid decât în cazul undelor gravitaţionale emise de un pulsar dublu: electronul din atom şi-ar pierde întreaga energie după o fracţiune de secundă, iar apoi s-ar ciocni de proton. Spre deosebire de scăderea lentă a dimensiunilor pulsarului dublu, acest comportament intră în flagrantă contradicţie cu observaţia că atomul de hidrogen e stabil. Descrierea clasică eşuează lamentabil – pentru toţi atomii, nu doar pentru cel de hidrogen. Dacă s-ar supune legilor clasice, materia n-ar fi stabilă, fiindcă e alcătuită din atomi care n-ar supravieţui nici măcar o secundă. Poate că problema nu e la fel de delicată ca aceea a singularităţilor din relativitatea generală, unde spaţiul şi timpul ajung la capăt, dar e mai concretă – la urma urmei, instabilitatea materiei ne-ar afecta direct.

Teoria cuantică rezolvă problema stabilităţii atomilor într-o manieră elegantă, dar care, din păcate, contrazice intuiţiile noastre. Pentru a vedea cum o face, să începem prin a vorbi despre principiile generale ale teoriei cuantice.

Funcţia de undă:
Fluctuaţii, superpoziţii, limitări

> Acum, când Yossarian privea înapoi, părea că mai degrabă sora Cramer, şi nu flecarul texan îl omorâse pe soldatul în alb; dacă n-ar fi citit termometrul şi n-ar fi raportat ceea ce descoperise, poate că soldatul în alb ar fi zăcut încă acolo viu, aşa cum zăcuse până atunci, împachetat din creştet până-n tălpi în ghips şi bandaje […].
>
> Joseph Heller, *Catch 22*[23]

Teoria cuantică ne spune că protonii, electronii şi tot restul nu sunt particule de tip clasic, reprezentate ca puncte geometrice sau sfere rigide. Ceea ce numim particulă corespunde unei funcţii de undă: un obiect extins, desfăşurat şi difuz datorită caracterului său ondulator. Nu are o suprafaţă distinctă, ca o minge; în exteriorul unei regiuni centrale se estompează treptat. La fel cum micile valuri se propagă leneş pe suprafaţa apei, fără să ne indice cu precizie când anume a trecut un înotător, funcţiile de undă din teoria cuantică nu au frontiere bine definite. Chiar dacă cozile lor au înălţimi minuscule, ele se pot extinde departe de centru, locul care poate fi considerat analogul „poziţiei" unei particule clasice. De aici decurg multe fenomene care la prima vedere par imposibile, dar care pot fi într-adevăr observate.

Ceea ce pare, de asemenea, contraintuitiv este interacţiunea diferitelor obiecte descrise prin funcţii de undă. În timp ce particulele clasice pot fi aşezate în locuri separate şi ciocnite între de la diferite viteze pentru a vedea cum se mişcă, o singură funcţie de undă ocupă deja tot spaţiul. Chiar dacă înălţimea ei poate fi foarte mică departe

de centru, ea nu este exact zero. Dacă o altă funcţie de undă e prezentă undeva în spaţiu, mediul în care se află ea diferă de cel care ar fi fost în absenţa primei funcţii de undă. Aşa se întâmplă şi atunci când cele două regiuni centrale sunt la mare distanţă una de alta, ceea ce ne-ar permite să ignorăm tot felul de forţe atractive sau repulsive. Simpla prezenţă a primei funcţii de undă, oriunde în univers, are o anumită influenţă asupra oricărei alte funcţii de undă.

Este într-adevăr ciudat că stări diferite ale unui singur obiect pot fi suprapuse şi coexistă. Erwin Schrödinger, unul dintre părinţii mecanicii cuantice, a prezentat situaţia aceasta într-un experiment mintal care avea să fie numit „Pisica lui Schrödinger”. O pisică e închisă într-o incintă înconjurată de pereţi opaci, unde se află un mecanism care poate ucide: o substanţă radioactivă care, prin radiaţia emisă asupra unui detector, declanşează spargerea cu un ciocan a unei fiole ce conţine un gaz otrăvitor. Substanţa are o radioactivitate slabă – doar rareori emite o particulă spre detector, punând astfel în funcţiune dispozitivul criminal.

Dacă şi când radiaţia va atinge detectorul ţine, la fel ca întreaga lume atomică, de mecanica cuantică. Obiectele macroscopice, cum e pisica, trebuie în cele din urmă să se supună aceloraşi legi ale mecanicii cuantice, dar, de regulă, lucrul acesta nu e observabil la scara mare a experienţei noastre cotidiene. Acesta e motivul pentru care fizica clasică a putut descrie totul atât de bine, până când măsurătorile precise au dezvăluit subtilităţile lumii cuantice. În cazul acesta însă, prin intermediul ciocanului şi al otrăvii, capriciile cuantice ale substanţei radioactive sunt transferate direct lumii macroscopice a pisicii, rămasă la cheremul legilor mecanicii cuantice. Nu există nicio lege care să spună exact în ce moment are loc dezintegrarea substanţei; există doar o lege pentru probabilitatea

de dezintegrare. Conform mecanicii cuantice, asta înseamnă că atomii substanţei nu se află într-o stare fixată, fie pe punctul de a se dezintegra, fie nepregătiţi încă să se dezintegreze, ci în ambele! Atomii se află într-o superpoziţie a celor două posibilităţi, iar biata pisică, la rândul ei, rămâne ca un zombi într-o combinaţie de viaţă şi moarte. Atunci şi numai atunci când măsurătoarea este efectuată, de pildă dacă arunci o privire să vezi ce s-a ales de pisică, se ajunge la o stare precisă, în care aceasta fie a sucombat, fie nu. În limbajul mecanicii cuantice, funcţia de undă colapsează în acel moment din superpoziţia ei într-o stare cu un rezultat precis al măsurătorii.

Rezultatul final al măsurătorii e însă nedeterminat. Odată colapsată funcţia de undă, o nouă verificare nu va conduce la o stare diferită; dacă pisica e găsită moartă, nu poate fi înviată întorcându-ne pur şi simplu privirea de la ea. După măsurătoare rezultatul e definitiv, dar, înainte de a efectua prima măsurătoare, nu se pot face decât afirmaţii probabilistice privind rezultatul. Dacă repetăm experimentul cu o sută de pisici, toate aflate la cheremul aceluiaşi dispozitiv criminal, mecanica cuantică ne poate spune doar cât de des găsim pisici vii şi pisici moarte, după un anumit interval de timp, dar nu ne poate spune care dintre ele vor fi vii şi care moarte. Nu e posibil nici măcar să obţinem informaţii suplimentare înainte de a observa pisicile. Nenumărate teste au arătat că mecanica cuantică este o teorie fundamentală. Natura ei probabilistică nu e o consecinţă a limitărilor teoriei, din principiu ea nu poate fi evitată. Cu cât sunt mai variate posibilităţile incomplet determinate – spre deosebire de cazul clasic, în care nu se poate realiza decât o singură posibilitate –, cu atât este mai important rolul teoriei cuantice. Vorbim atunci despre fluctuaţii cuantice puternice – ceea ce înseamnă că

rezultatele pot diferi mult de la o măsurătoare la următoarea.

În lumea clasică nu suntem obişnuiţi cu superpoziţii. Desigur, uneori avem îndoieli înainte ca o bănuială să devină certitudine, dar suntem convinşi că una dintre posibilităţi s-a realizat, însă nu ştim care. În mecanica cuantică lucrurile stau cu totul altfel. Şi aici există incertitudine, numai că putem demonstra matematic că superpoziţiile creează o situaţie nouă. Este sigur că obiectele microscopice există într-adevăr în superpoziţii ale diferitelor stări, lucru confirmat de multe măsurători. Nu au fost observate superpoziţii pentru obiectele macroscopice, cum sunt pisicile, deşi în principiu ar fi posibil. A aduce obiectele mari şi a le menţine într-o superpoziţie e mai complicat. Asta explică de ce nu suntem obişnuiţi cu acest aspect din experienţa noastră clasică curentă, iar intuiţia are dificultăţi în faţa noţiunii de superpoziţie. Următorul fragment este o ilustrare a superpoziţiei şi a colapsului ei în final:

> Ea era un mic păianjen şi, fiindu-i foame, şi-a ţesut o pânză. Ce altceva să facă? Stătea nemişcată în colţul ei, cu picioruşele întinse, privind cu toţi ochii prin plasă şi aşteptând să se întâmple ceva. Nu se gândea prea mult, fiindcă, la drept vorbind, nici nu prea ştia la ce ar trebui să se gândească un păianjen. Îşi trecea timpul în aşteptarea acelui eveniment care avea să vină negreşit şi avea să-i potolească foamea.
>
> Curând însă, i-a trecut ceva prin minte. Nu un gând, căci ea tot nu ştia la ce ar trebui să se gândească un păianjen. Fără să-şi dea seama, şi-a adus cumva aminte că uneori păianjenii îşi mănâncă semenii, masculi sau femele. S-a cutremurat. Măcar de-ar fi ea cea care mănâncă, nu cea mâncată. Foamea o chinuia tot mai rău.
>
> Habar n-avea de cât timp stătea acolo, în poziţia ci confortabilă. De fapt, n-avea un simţ al timpului prea dezvoltat. Deşi instinctiv ştia că lucrurile se schimbă – deseori stomacul ei era la fel de gol ca plasa, dar din când în

când avea parte de un festin, n-avea noţiunea timpului. Era oare mai plictisitor să zacă aşteptând aşa decât dacă timpul n-ar fi existat deloc? Ce idee nebunească! Aproape că a adormit.

În fine, ceva i-a atras atenţia. Auzise un sunet ascuţit care i s-a părut că făcuse plasa să vibreze. Sunetul acesta, atât de familiar, şi totuşi străin pentru mica ei lume, i-a produs o scurtă izbucnire de furie, care i-a întrerupt odihna. Apoi, ştiind despre ce e vorba, s-a înviorat: în curând nu-i va mai fi foame. Cunoştea, fără să-şi dea seama cum, înţelesul sunetului, şi a auzit limpede cuvintele: „Cina e servită!" Păianjenul a murit pe neştiute, iar ea a coborât scările.

La fel cum aparenta contradicţie din ultima propoziţie lămureşte suprapunerea dintre „ea" (o fată care se crede păianjen) şi „păianjenul", o măsurătoare asupra sistemului cuantic îl aduce într-o stare bine definită prin colapsul funcţiei de undă.

Superpoziţiile joacă un rol important în teoria cuantică şi în aplicaţiile sale. Pe baza lor urmează să fie construite calculatoarele cuantice, în care biţii clasici, purtătorii elementari ai informaţiei, ar fi înlocuiţi cu biţi cuantici – „qubiţi", care ar permite mai multe combinaţii. Dacă ar putea fi realizată o construcţie stabilă, păstrând superpoziţiile neperturbate un timp suficient de lung, calculele ar fi efectuate mult mai repede decât cu computerele tradiţionale. Diferite părţi ale funcţiei de undă ar putea participa simultan la un calcul, în loc să fie procesat un lung lanţ de contribuţii consecutive, aşa cum se întâmplă la computerele clasice, ceea ce ar conduce la noi algoritmi de calcul.

În afară de posibilitatea superpoziţiilor, teoria cuantică prezintă câteva diferenţe importante faţă de principiile de la sine înţelese în fizica clasică, precuantică. Spre deosebire de o particulă clasică, obiectelor descrise prin funcţii de undă nu fi se pot atribui poziţii şi viteze precise. Măsurătorile

asupra poziţiei sau vitezei sunt mereu afectate de o incertitudine inerentă, care nu poate fi eliminată prin îmbunătăţirea aparatului de măsură. Într-o măsurătoare asupra poziţiei putem găsi, în principiu, orice valoare în regiunea unde înălţimea funcţiei de undă este nenulă. Făcând şi alte măsurători, găsim de fiecare dată valori diferite în acea regiune; un număr mare de măsurători conduce la o distribuţie a rezultatelor în care frecvenţa unei anumite poziţii măsurate e dată de modulul pătrat al funcţiei de undă în acel punct. Desigur, nu ne-am aştepta să localizăm o funcţie de undă departe de centrul ei, şi totuşi, din moment ce înălţimea ei e diferită de zero, acest lucru nu e exclus. Spre deosebire de unda de pe suprafaţa apei, care poate fi văzută în întregime la lumina zilei, măsurătorile asupra funcţiei de undă cuantice sunt ca un număr mic de încercări aleatoare de a-i pipăi forma pe întuneric. Înainte de a măsura funcţia de undă suficient de des pentru a-i stabili cu precizie poziţia, ea se va fi deplasat sau – doar pentru că a fost atinsă – îşi va fi schimbat forma.

Teoria cuantică ne spune că înălţimea funcţiei de undă într-un anumit punct determină cât de des putem considera că în acel loc se află particula. În termeni matematici, această distribuţie este o probabilitate – probabilitatea pentru rezultatul „poziţia x” e dată de modulul pătrat al înălţimii funcţiei de undă în acel punct. Dacă înălţimea într-un loc e mai mare decât în altul, e mai probabil să identificăm acel loc drept poziţia particulei. În mod asemănător pot fi găsite probabilităţi pentru măsurători asupra vitezei sau asupra altor mărimi de interes. Ne-am putea gândi atunci că, pentru a determina întreaga funcţie de undă, e de-ajuns să măsurăm poziţia suficient de des, deducând din rezultatele individuale pentru toate aceste puncte din spaţiu forma funcţiei de undă. Când fiecare poziţie măsurată e reprezentată într-o diagramă, regiunile mai întunecate vor fi cele unde particula

a fost găsită mai des, iar cele doar vag umbrite vor fi cele unde particula ajunge doar rareori. Vor rezulta contururi imprecise, dar perceptibile, pe care le putem interpreta ca pe forma unui obiect măsurat.

Aceasta e însă o imagine prea clasică a unei unde pentru a fi aplicată teoriei cuantice. Asemenea măsurători vor fi atât de sensibile, încât însuşi procesul de măsurare va influenţa starea descrisă de funcţia de undă. După măsurarea poziţiei, funcţia de undă este alta decât fusese la început. În majoritatea cazurilor, procesul de măsurare „colapsează" funcţia de undă – cam aşa cum se întâmplă cu „patul cuantic" al lui Gawain – *lit marveile* (patul fermecat):

> El [Gawain] intră. Podeaua lustruită strălucea precum sticla. Pe ea era aşezat acel fabulos pat: *lit marveile!* […] De cum făcea el un pas, patul se mişca. […] „Cum să ajung cu la tine?" se întreba el. „Te încăpăţânezi să fugi? Îţi arăt eu ţie, numai să mă pot sălta pe tine!" Patul stătea nemişcat în faţa lui. El sări şi ateriza drept în mijloc, iar pe dată patul se sfărâmă cu totul.
>
> Wolfram von Eschenbach, *Parsifal*

Nu putem deci niciodată determina complet funcţia de undă prin măsurători repetate ale unui obiect. Metode de a manevra cu delicateţe funcţia de undă există, însă orice măsurătoare exercită o anume influenţă. Problema este una de principiu, şi nu poate fi eludată prin perfecţionarea tehnologiilor; dacă oferă vreo informaţie, fiecare măsurătoare interacţionează în mod necesar cu obiectul măsurat.

În viaţa de zi cu zi, putem cerceta forma şi textura suprafeţelor prin atingere, fără ca obiectele solide să fie deteriorate. Obiectele delicate sunt însă modificate sau chiar distruse prin contact, şi nu pot fi examinate în felul ăsta, aşa că, în locul

degetelor noastre, trebuie să apelăm la instrumente de investigare mai fine, de pildă la cele optice. Chiar şi lumina transportă energic şi interacţionează cu obiectul pentru a-i scoate în evidenţă proprietăţile, iar astfel are loc un schimb de energie. Până şi lumina slabă are prea multă energie pentru a lăsa neperturbate fragilele funcţii de undă atomice. Fiecare măsurătoare modifică obiectul ei, ceea ce aduce cu sine o limitare a informaţiei dobândite. Prin tehnologii sofisticate nu putem spera decât să determinăm proprietăţile funcţiei de undă la limita permisă de mecanica cuantică. Asemenea măsurători delicate sunt numite „nedemolare cuantică" *quantum nondemolition,* fiindcă încearcă să nu distrugă funcţia de undă. Dar, chiar şi în cazul acesta, funcţia de undă nu poate fi complet determinată. În fond, ea nu reprezintă un obiect fizic observabil în toate detaliile lui, ci o descriere matematică a tuturor proprietăţilor accesibile.

Influenţa măsurătorii asupra unui obiect are consecinţe importante: relaţiile de incertitudine ale lui Heisenberg. Ele apar atunci când sunt măsurate aşa-numitele mărimi complementare. Poziţia şi viteza particulei, descrise de funcţia de undă, sunt cel mai cunoscut exemplu de mărimi complementare. În acest caz, principiul incertitudinii poate fi demonstrat intuitiv printr-un proces de măsurătoare explicit, însă doar sub forma unui experiment mintal. Un microscop ne permite, de pildă, să măsurăm poziţia unei particule prin lumina împrăştiată de ea. În absenţa particulei, lumina s-ar propaga în linie dreaptă de la sursă la detector; când lumina e împrăştiată de particulă în diferite direcţii, particula poate fi localizată. Această împrăştiere, esenţială pentru succesul detecţiei, este o interacţiune care influenţează obiectul cercetat. Lumina transportă energie, iar procesul de împrăştiere modifică starea de mişcare a particulei. Dacă, de pildă, particula s-

a aflat iniţial în repaus, ea va începe să se deplaseze uşor după ce lumina a ricoşat de pe ea. Pentru obiectele macroscopice cu care avem de-a face în mod curent, această modificare este imperceptibilă, dar joacă un rol esenţial pentru un obiect microscopic cum e electronul.

În timpul unei măsurători foarte precise a poziţiei, viteza unei particule se schimbă în mod inevitabil – acestea sunt tocmai mărimile complementare în exemplul de faţă. Cu cât încercăm să măsurăm mai precis poziţia, cu atât efectul asupra vitezei e mai mare: o rezoluţie mai bună presupune folosirea unei lumini de energie mai mare – după cum se vede atunci când trecem de la microscopul optic la cel electronic. O lumină de energie mai mare afectează mai puternic viteza; la o mai precisă măsurare a poziţiei, măsurarea vitezei devine mai puţin precisă – aceasta e relaţia de incertitudine pentru mărimi complementare: creşterea preciziei în măsurarea uneia din ele se face pe seama scăderii preciziei în măsurarea celeilalte.

În teoria cuantică, relaţia de incertitudine este o lege a naturii, şi nu poate fi evitată dacă teoria cuantică e valabilă.[24] În ciuda acestor limitări, funcţia de undă are consecinţe importante pentru atomi. Spre deosebire de modelul clasic în care electronul se roteşte în jurul nucleului, funcţia de undă face ca atomul să nu poate avea decât anumite stări energetice bine precizate – infinit de multe, dar constituind o mulţime discretă.

Atomii:
Stabilitate din inconstanţă

Un electron de energie dată, legat în atom prin atracţia electrică, are o funcţie de undă sferică, de lungime de undă fixată, care înconjoară nucleul. Felul în care mecanica cuantică ne conduce la un set discret de energii poate fi văzut într-o situaţie amplificată, în care funcţia de undă se află pe un cerc. Lungimea de undă (distanţa dintre două creste sau două văi învecinate) este legată în mecanica cuantică de viteza sau impulsul electronului: cu cât viteza electronului e mai mare, cu atât unda oscilează mai repede, aşa încât lungimea de undă e mai mică. Dacă urmărim unda în jurul centrului cercului, întorcându-ne în punctul de unde am pornit şi depăşindu-l, în general nu se va suprapune peste ea însăşi – o creastă nu va cădea peste poziţia ei iniţială, cu excepţia cazului în care un număr întreg de lungimi de undă se potrivesc cu circumferinţa cercului (vezi figura 5).

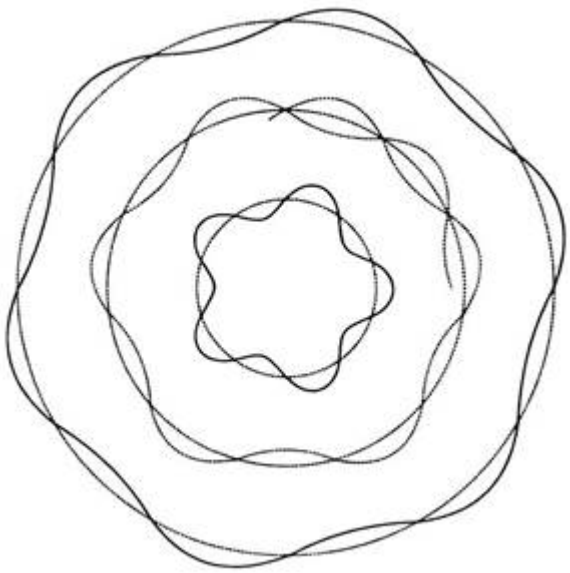


Figura 5. *Plierea unei unde de-a lungul unui cerc nu e posibilă decât pentru raze ale cercului aparţinând unei mulţimi discrete. Dacă raza şi lungimea de undă nu se potrivesc (ca la unda reprezentată prin linie întreruptă), după ce parcurge circumferinţa, unda e decalată faţă de poziţia iniţială.*

Dacă există o nepotrivire, noile creste vor fi decalate pe măsură ce parcurgem cercul, iar la un moment dat o nouă creastă cade peste o veche vale: înălţimile undei se vor anula, şi întreaga undă va dispărea într-o interferenţă destructivă. Doar în cazuri excepţionale, în care circumferinţa cercului este un multiplu exact al lungimii de undă, crestele se vor suprapune exact pe creste, iar interferenţa destructivă nu va avea loc.

Prin urmare, un electron aflat pe un cerc de rază dată nu se poate deplasa decât cu viteze care aparţin unei mulţimi discrete; altminteri, funcţia lui de undă, deci electronul însuşi, nu poate exista. Deocamdată am considerat doar natura ondulatorie a mecanicii cuantice, nu şi proprietăţile forţelor care menţin electronul pe cerc. Aceste forţe impun condiţii suplimentare, căci ele ne spun cum e accelerat sau încetinit electronul. Mai mult, pentru mişcarea de-a lungul cercului, trebuie să existe un echilibru între forţa exercitată de centru, care atrage electronul, şi tendinţa firească a electronului de a urma o traiectorie dreaptă care să-l arunce în afara cercului. Avem deci două condiţii pentru electron, ambele legând viteza sa de raza cercului: una care există şi în mecanica clasică, din moment ce se referă doar la forţă, şi una cuantică – circumferinţa cercului trebuie să fie multiplu întreg al lungimii de undă. Cele două condiţii au forme diferite, deci pot fi îndeplinite doar pentru anumite raze. Dacă una dintre razele permise variază cât de puţin, lungimea de undă nu mai e acordată cu circumferinţa, şi nu mai pot fi satisfăcute ambele condiţii. Prin urmare, cerinţa ca multipli întregi de lungimi de undă să se potrivească perfect într-un

cerc, cerinţă care apare numai datorită caracterului ondulator al mecanicii cuantice, face ca electronul să nu se poată deplasa decât pe cercuri cu raze bine determinate, aparţinând unei mulţimi discrete.

Pentru un electron din jurul nucleului, acestea sunt orbitele „permise”, fiindcă numai pentru ele funcţia de undă este nenulă. Din moment ce viteza e legată de rază, iar ambele determină energia, şi energiile aparţin unei mulţimi discrete. Deşi în atom mişcarea e mai complexă, se aplică acelaşi raţionament: energiile electronului pe diferite orbite nu pot fi oricât de apropiate între ele; o mică schimbare a energiei ar produce decalarea crestelor în funcţia de undă. Dacă vrem să schimbăm energia, trebuie s-o facem cu o cantitate bine definită, aşa încât crestele să se suprapună din nou. O consecinţă imediată a naturii ondulatorii a electronilor este structura în formă de scară a energiilor permise, spectrul energetic discret (vezi figura 6). Dimpotrivă, în fizica clasică, unde nu există o condiţie suplimentară pentru lungimea de undă, alegerea unei raze pentru orbita electronului nu impune nicio restricţie asupra valorii energiei.

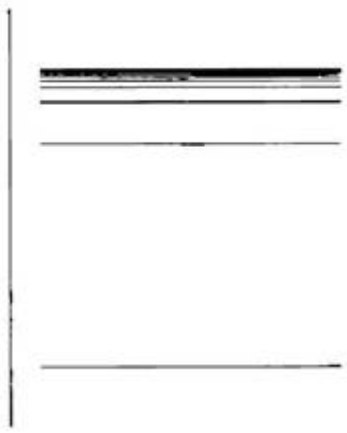


Figura 6. *Pentru un electron legat în atomul de hidrogen, energia poate lua infinit de multe valori, care ocupă un domeniu limitat. Ele se aglomerează către o valoare în a cărei vecinătate distribuţia lor pare continuă. Aici, proprietăţile tipic cuantice nu mai sunt evidente, spre deosebire de ce se întâmplă la valorile joase ale energiei, unde sunt distanţe mari între energiile permise.*

Faptul că energiile nu pot fi oricât de mici ne aduce înapoi la problema stabilităţii atomice. Din punct de vedere clasic, electronul, ca orice particulă încărcată electric şi aflată pe o orbită circulară, ar emite întreaga sa energie, prăbuşindu-se imediat pe nucleu. Pentru un electron cuantic cu proprietăţi ondulatorii, acest lucru nu se întâmplă, datorită naturii restrictive a condiţiei suplimentare, care am văzut că impune spectrul energetic discret. Mai intuitiv, putem lega în acest caz efectele cuantice de necesitatea existenţei unor forţe opuse, ceea ce va conduce la o reprezentare vizuală a funcţiei de undă şi a rolului său.

Pentru ca atomul de hidrogen să fie stabil, avem nevoie de o nouă forţă, care să se opună pierderii clasice de energie prin radiaţie. Această forţă apare atunci când distanţa dintre electron şi protonul din nucleu e mai mică decât lărgimea funcţiei de undă. Deşi cea mai mare parte a funcţiei de undă rămâne concentrată în zona unde nu se află protonul, o parte importantă e în zona unde se află protonul. (Nici protonul nu e o particulă clasică, şi ar trebui să fie descris printr-o funcţie de undă, dar lărgimea ei e mult mai mică, datorită masei mult mai mari a protonului, şi nu joacă un rol important aici: protonul, mai greu, nu se mişcă atât de violent ca electronul, deci poziţia lui e mai bine definită.)

Din moment ce funcţia de undă ne dă probabilitatea pentru poziţia electronului, există acum posibilitatea ca el să se afle de cealaltă parte a protonului. Electronul va fi în continuare atras de proton, dar, după cum se vede în figura 7, forţa în acest caz va acţiona în sens contrar forţei din situaţia în care electronul se află în prima zonă. Rezultă deci o forţă de respingere, contrară atracţiei electrice dintre două particule punctiforme, şi care stabilizează atomul. Respingerea e maximă dacă funcţia de undă a

electronului este centrată pe proton, ca o sferă în jurul lui, configuraţie ce corespunde, conform mecanicii cuantice, stării de energie minimă.[25] Avem aici un exemplu care ne arată că teoria cuantică poate conduce la apariţia unor noi forţe, şi deci la stabilitate.

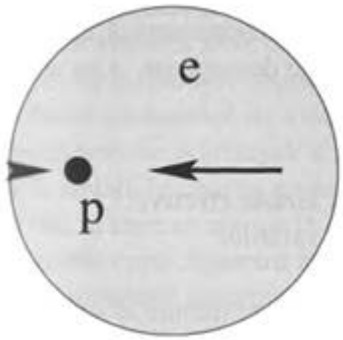


Figura 7. *Funcţia de undă extinsă a electronului nu se poate afla strict de o parte anume a protonului. Atracţia electrică din părţi diferite înseamnă, intuitiv vorbind, forţe repulsive (săgeţi opuse) datorate naturii cuantice a particulelor, iar ele fac ca atomul să fie stabil.*

Astfel, există stări distincte ale atomului, cu energii net separate, diferenţa dintre ele neputând fi oricât de mică. Starea de energie minimă se numeşte *stare fundamentală,* iar cele de energie superioară se numesc stări excitate. Aflat într-o stare excitată, atomul poate emite energie sub formă de lumină, iar electronul ocupă o stare de energie mai joasă. Datorită faptului că energia atomului ia valori discrete, energiile emise au, la rândul lor, doar valori bine precizate, lucru care poate fi observat în proprietăţile luminii emise – frecvenţa e proporţională cu energia –, iar apoi comparat cu calculele din teoria cuantică, toate aceste teste experimentale au fost trecute cu succes de teoria cuantică.

Asemenea date, imposibil de explicat prin teoria clasică, au apărut încă înainte de elaborarea teoriei

cuantice, prin măsurarea directă a spectrelor discrete de emisie şi absorbţie. Fizicienii au găsit în ele indicii importante privind felul în care trebuia modificată fizica clasică. Altminteri, teoria cuantică, cu straniile ei consecinţe, n-ar fi fost pesemne descoperită, şi cu atât mai puţin acceptată.

Limita clasică şi forţele efective:
Spargerea valurilor

Extinderea teoriilor deja acceptate trebuie să explice noi date de observaţie, fără să intre în contradicţie cu fenomenele explicate prin teoriile vechi. Este imposibil să reevaluezi fiecare explicaţie pentru a demonstra că nu apare nicio contradicţie, dar fizicienii se folosesc de faptul că extinderile teoriilor introduc de regulă un nou parametru: o nouă constantă a naturii. Fenomenele explicate doar prin noua teorie permit determinarea valorii acestui parametru prin comparaţia predicţiilor teoretice cu măsurătorile. Pe de altă parte, vechea teorie poate fi privită ca o limită a teoriei extinse, în care parametrul ia o anumită valoare fixată, incompatibilă cu observaţiile recent explicate; de regulă, această valoare incompatibilă e zero, dar ea poate fi şi infinită, lucru permis într-un asemenea proces de trecere la limită.

În relativitate, noul parametru este viteza luminii, presupusă implicit a fi infinit de mare în fizica newtoniană. Fără o limită superioară pentru vitezele de propagare, cum e cea a luminii, o masă poate acţiona instantaneu asupra altor mase oricât de îndepărtate – ceea ce justifica acţiunea la distanţă în legea newtoniană a gravitaţiei. În teoria cuantică, noul parametru; este *constanta lui Planck*, care determină mărimea salturilor cuantice ale energiei. (Încă înainte de apariţia mecanicii cuantice, această constantă a fost introdusă de Max Planck în legătură cu radiaţia corpului negru, după cum vom vedea mai jos.) Acest parametru poate fi măsurat în spectrele de emisie, dezvăluind natura discretă a stărilor excitate. Dacă dăm constantei lui

Planck valoarea zero, eliminăm distanţele dintre nivelele de energie, iar la limită se obţine fizica clasică. Matematic, este o cale foarte economică de a demonstra că nu se pierde nimic din vechea teorie. Afirmaţiile acesteia din urmă se referă oricum doar la situaţii în care nu apare caracterul discret ai energiilor.

Felul în care se ajunge la comportamentul clasic poate fi demonstrat explicit pentru funcţii de undă atent alese. Acest lucru e important, pentru că, în ciuda aplicabilităţii universale a teoriei cuantice, există multe situaţii în care obiectele macroscopice sunt descrise foarte precis prin calcule clasice. La fotbal, în executarea unei lovituri de la unsprezece metri, un portar trebuie să fie atent la multe, dar n-are de ce să se teamă că, drept consecinţă a principiului incertitudinii, mingea va apărea brusc într-o poziţie complet diferită de cea în care se aflase cu o clipă în urmă. Există funcţii de undă pentru obiecte macroscopice, ele se numesc funcţii de undă *semiclasice*, şi, cu toate că fac obiectul teoriei cuantice, comportamentul lor poate fi explicat prin fizica clasică.

Starea fundamentală a unui atom nu poate fi descrisă în aceşti termeni, pentru că prezintă un comportament manifest cuantic, altminteri n-ar rezolva problema clasică a instabilităţii. Nici stările excitate apropiate de ea, la care salturile cuantice sunt importante, nu sunt semiclasice. Când atomul ajunge însă în energii mai înalte, deci e mai puternic excitat, salturile cuantice devin mai mici, pentru că există infinit de multe nivele energetice, şi e nevoie doar de o cantitate finită de energie pentru a îndepărta electronul din atom. Atomii pot fi într-adevăr ionizaţi dacă primesc o cantitate suficientă de energie, pierzând astfel unul sau mai mulţi electroni şi devenind ioni cu sarcină electrică pozitivă. Toate acele nivele de energie infinit numeroase ocupă un domeniu energetic finit şi trebuie să se înghesuie până la o anumită valoare

figura 6). În această zonă distanţele dintre nivelele de energie învecinate devin foarte mici, iar comportamentul se apropie de cel clasic.

O funcţie de undă a atomului în acest domeniu în care nivelele de energie sunt îndesite arată ca o singură creastă (vezi figura 8). În timp, ea urmează o traiectorie conformă cu ecuaţiile clasice ale mişcării. Avem de-a face cu o funcţie de undă cu o anumită extindere; riguros vorbind, poziţia electronului tot nu e precis definită, dar, în primă aproximaţie, lărgimea funcţia de undă poate fi ignorată, permiţându-ne să considerăm locul în care unda îşi atinge maximumul drept „poziţia" electronului. Astfel, teoria clasică apare ca un caz limită al mai generalei teorii cuantice.

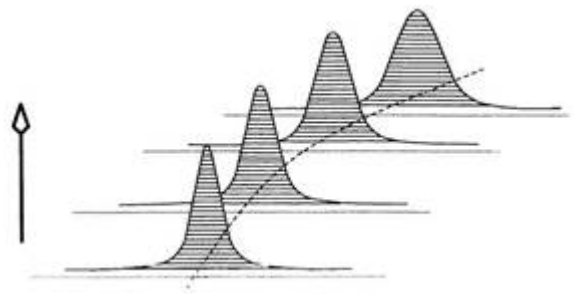


Figura 8. *O undă deplasându-se de-a lungul curbei întrerupte şi lărgindu-se odată cu trecerea timpului (orientat în sus).*

Cercetând mai atent, nici undele semiclasice nu se supun riguros legilor clasice de mişcare. Urmărind evoluţia unei funcţii de undă semiclasice în cursul unor intervale de timp tot mai lungi, vom observa abateri tot mai pronunţate de la traiectoria clasică. În fond, evoluţia funcţiei de undă e dată de ecuaţia Schrödinger (o ecuaţie diferenţială care arată cum variază funcţia de undă în perioade foarte scurte). Contează nu numai poziţia maximumului undei, dar şi lărgimea ei. Doar în cazuri excepţionale maximumul urmează cu stricteţe traiectoria clasică; altminteri, forma schimbătoare a întregii funcţii de undă o abate de la curba clasică. La fel ca în cazul undelor de la

suprafaţa apei, o structură neuniformă pe fundul lacului influenţează diferit viteza diferitelor părţi ale undei. De o parte a vârfului, ea se poate retrage în urma maximumului, ca şi cum coasta unui munte ar aluneca în jos. Vârful muntelui se deplasează prin schimbarea formei întregului munte, în plus faţă de mişcarea lui rigidă; ambele contribuţii sunt ilustrate în figura 9. Pentru o funcţie de undă semiclasică, asemenea abateri provocate de formă sunt mici. La început, ar putea părea că traiectoria clasică e urmată cu stricteţe, dar, în timp, abaterile se acumulează şi trebuie făcute corecţii pentru a obţine o descriere exactă.

Datorită acestor abateri de la traiectoriile clasice, efectele teoriei cuantice pot fi confirmate experimental.

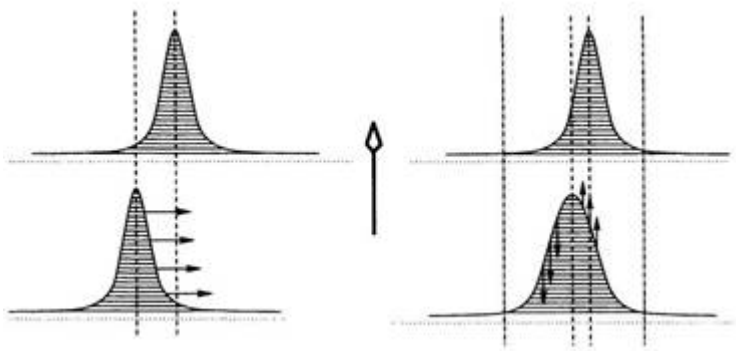


Figura 9. *În funcţie de condiţiile întâlnite, o undă se poate deplasa rigid, fără să-şi schimbe forma (stânga), sau îşi poate modifica înălţimea de la un loc la altul. De pildă, unda se prăbuşeşte în partea stângă, aşa încât maximumul pare că se deplasează spre dreapta. Asemenea modificări care afectează anumite părţi ale undei nu apar în fizica clasică, dar ele influenţează poziţia maximumului. Pentru a descrie cu precizie poziţia trebuie introduse corecţii cuantice la ecuaţiile clasice, sub forma unor forţe efective.*

Presupunând că aceste corecţii corespund unor deplasări mici ale traiectoriei (în comparaţie, de pildă, cu raza atomului într-o asemenea stare), putem folosi o aproximaţie matematică numită

teoria pertubaţiilor: deplasarea e privită ca o uşoară abatere de la traiectoria clasică şi poate fi calculată mai uşor. În loc să calculăm funcţia de undă semiclasică rezolvând o ecuaţie Schrödinger complicată, pot fi modificate ecuaţiile clasice, iar soluţiile noilor ecuaţii descriu mai bine evoluţia funcţiei de undă decât soluţiile ecuaţiilor pur clasice. Aceste ecuaţii modificate pot încorpora, de pildă, o forţă necunoscută fizicii clasice şi care ţine cont de schimbarea formei undei.

Modificările ecuaţiilor clasice poartă numele de *corecţii cuantice* şi, spre deosebire de termenii clasici, depind de constanta lui Planck. Când valoarea acestei constante e considerată zero, corecţiile cuantice se anulează – alt exemplu privind felul în care teoria clasică apare drept un caz limită al teoriei cuantice. Ecuaţiile modificate sunt deseori utile pentru că permit nu doar calcule mai simple, ci şi o înţelegere intuitivă a fenomenelor cuantice. Deşi funcţiile de undă apar indirect în determinarea corecţiilor cuantice, proprietăţile lor (cum ar fi dificultăţile de a măsura simultan poziţia şi viteza, conform relaţiei de incertitudine) nu e nevoie să fie luate explicit în considerare – ele sunt deja înglobate în deducerea corecţiilor. Aceste ecuaţii – numite *efective* – au jucat un rol important încă de la începuturile mecanicii cuantice.

Mai ales în aplicaţiile semiclasice ale teoriei cuantice întâlnim efecte care pot fi vizualizate prin analogie cu undele de pe suprafaţa unui lac. Maximumul undei corespunde poziţiei unei particule clasice, dar unda are întotdeauna o lărgime, aşa încât poziţia particulei nu e precis determinată. Datorită lărgimii sale, unda e sensibilă la eventualele neuniformităţi de pe fundul lacului, chiar şi din locuri în care particula n-ar ajunge niciodată conform fizicii clasice. Coada undei se poate de pildă extinde în părţi mai puţin adânci ale lacului, chiar dacă maximumul se află

undeva departe. O undă se propagă diferit în ape adânci şi în ape mai puţin adânci: viteza undelor depinde de adâncimea lacului în zonele unde se propagă. Prin urmare, direcţia şi forma ei depind de structura de pe fundul lacului. Un exemplu binecunoscut e faptul că valurile mării se îndreaptă mereu spre plajă fiindcă sunt direcţionate de adâncimea descrescătoare a mării. Schimbările în forma undei datorate profilului fundului mării pot fi văzute atunci când valurile se apropie şi se sparg de ţărm.

Spargerea valurilor nu mai are nimic în comun cu comportamentul unei particule şi nu mai poate fi considerată rezultatul unor mici perturbaţii asupra mişcării simple. Dar, înainte ca valul să se spargă, profilul fundului mării face ca poziţia vârfului său să fie uşor decalată, fenomen care poate fi înţeles printr-o corecţie asupra deplasării valului deasupra unui fund al mării omogen. Apoi, valul se va răsfira şi mai mult, trimiţându-şi avangarda şi mai departe: datorită vitezelor diferite de propagare la diferite adâncimi ale mării, componentele valului sunt decalate diferit în cursul timpului, iar valul e şi mai răsfirat. (În cazuri excepţionale, valul poate fi concentrat într-o regiune mică, dar pentru aceasta e nevoie de un reglaj fin al tuturor componentelor lui; totuşi, după ce a fost concentrat un timp, el se dispersează iar.)

În plus faţă de nevoia unor corecţii la traiectoria particulei, pe baza faptului că unda reprezintă poziţia imprecisă a particulei, imaginea undelor pe suprafaţa apei ilustrează şi efectele cuantice la distanţă mare: regiuni îndepărtate, care, din perspectivă clasică n-ar juca niciun rol, influenţează poziţia undei. O descriere exactă presupune cunoaşterea întregii unde, nu doar a maximumului ei. De asemenea, lărgimea undei creşte în timp, influenţând astfel poziţia medie. În afară de poziţie şi lărgime, numeroşi alţi parametri sunt necesari pentru o descriere exactă a formei

undei. Niciun număr finit de parametri nu va fi de ajuns pentru a descrie complet unda, fiindcă aceasta presupune cunoaşterea înălţimii undei în infinit de numeroasele ei poziţii. Ca rezultat al influenţelor reciproce, toţi aceşti parametri sunt supuşi unor interacţiuni complicate de-a lungul timpului. În general, o descriere matematică corectă poate fi obţinută doar pe baza ecuaţiei Schrödinger. Din fericire, de regulă nu ne interesează întreaga undă, ci doar câţiva parametri, cum sunt poziţia maximumului şi lărgimea. În spatele acestei reducţii se află procedeul matematic al ecuaţiilor efective.

Asemenea tehnici de aproximare apar pretutindeni în fizică. Ele pot fi întâlnite în fizica particulelor, unde, la energii moderate, interacţiunile dintre particulele elementare pot fi descrise prin ecuaţii efective. În fizica energiilor înalte, nu vorbim despre lărgimea funcţiei de undă, ci despre crearea unei perechi particulă-antiparticulă, proces bazat pe o altă consecinţă a relaţiilor de incertitudine: există o imprecizie şi în privinţa energiei, aşa încât, pentru o perioadă scurtă de timp, ea poate fi folosită pentru crearea unei perechi constând dintr-o particulă şi antiparticula ei, cu condiţia ca perechea să se anihileze în scurt timp, pentru a returna energia împrumutată. Aici, funcţia de undă se desface când apar brusc două noi particule.

La fel cum propagarea şi lărgirea undelor pe un lac e influenţată de fundul apei, crearea perechilor depinde de mediu – în acest caz, de forma spaţiului-timp. Vom vedea mai târziu consecinţe uimitoare ale acestui proces în cosmologic şi în fizica găurilor negre. Uneori crearea de perechi poate genera fenomene violente, comparabile cu apariţia tsunamiurilor după cutremure. Dacă spaţiul-timp se extinde, mai ales când extinderea are loc accelerat, se pot produce unde de particule care iau forma unei materii nou create. Spre

deosebire de fundul oceanului în timpul unui cutremur, universul nu vibrează periodic, iar consecinţele nu sunt prea spectaculoase. Ceea ce e important însă este accelerarea mediului. După cum vom vedea în capitolul 5, o expansiune accelerată, numită *inflaţie cosmică*, se presupune că a avut loc în universul foarte tânăr. Dacă ideea e corectă, expansiunea accelerată din acel moment a fost de ajuns pentru a crea întreaga materie pe care o vedem azi, ca un val stârnit din vid.

Până acum am luat în considerare doar o singură undă care se întinde în spaţiu, dar în univers, ca şi pe suprafaţa lacului, există multe unde care se suprapun. În asemenea superpoziţii, undele îşi influenţează reciproc deplasarea, chiar şi fără contact direct, spre deosebire de cazul particulelor clasice solide. Şi dacă undele se îndepărtează, ele păstrează pentru mult timp amintirea interacţiei – fenomen numit de Schrödinger corelaţie [*entanglement*]. În mecanica cuantică, aceasta merge atât de departe, încât un eveniment petrecut cu o undă – de pildă, spargerea unui val de ţărm, sau un proces cuantic de măsurare – poate influenţa puternic alte unde din largul oceanului. Pentru valurile de pe mare, un asemenea efect puternic ar contrazice aşteptările noastre, dar în mecanica cuantică e posibil datorită aşa-numitei neliniarităţi a procesului de măsurare: într-un sistem neliniar, schimbări mici au efecte disproporţionat de puternice.

De ce însă obiectele macroscopice, pe care le întâlnim în viaţa de zi cu zi, nu sunt corelate în acest fel? În asemenea cazuri, este nevoie de contactul direct sau măcar de transmiterea unui semnal pentru a exista vreo influenţă. Corelarea funcţiilor de undă se dovedeşte că e foarte sensibilă la perturbaţii infime, pe care de obicei nu le observăm. Sunt de ajuns o moleculă de aer, un licăr de lumină sau (în vidul întunecat) o cantitate de căldură cât de mică pentru a face ca funcţiile de

undă să uite de corelare într-un proces numit *decoerenţă.*

Şi aici poate fi utilă imaginea lacului, dar un lac peste care plouă. Undele încă mai sunt vizibile, iar propagarea lor poate fi urmărită un timp îndelungat, însă fiecare picătură de ploaie produce câte o nouă undă mică. Toate aceste perturbaţii neregulate şterg detaliile relaţiilor de corelare. În mod asemănător, lumea la scară mare arată clasic pentru că fluctuaţiile şi corelarea sunt lesne distruse. La scară mică însă – în fizica microscopică sau în experimente atent efectuate –, perturbaţiile pot fi eliminate un timp suficient de lung pentru ca strania lume cuantică să se dezvăluie.

Prin urmare, pisica lui Schrödinger scapă de incertitudine: în orice formă de viaţă au loc atâtea procese, încât superpoziţiile cuantice sunt întotdeauna perturbate. Chiar dacă nu facem nicio măsurătoare asupra dispozitivului sau asupra pisicii, superpoziţia dezintegrare/nedezintegrare a substanţei radioactive – moartea şi supravieţuirea pisicii – este imediat transformată într-o stare bine definită. Pentru un timp, probabilitatea de dezintegrare e foarte mică, din cauza slabei radioactivităţi a substanţei, iar pisica rămâne în viaţă. Riguros vorbind, atomii substanţei se află într-adevăr într-o superpoziţie, dar contribuţia stării de dezintegrare e foarte mică. Perturbaţiile din sistem transformă superpoziţia rapid, aproape eu certitudine, într-o stare de nedezintegrare. După un timp însă, probabilitatea de dezintegrare devine suficient de mare pentru ca superpoziţia să fie dominată de starea de dezintegrare, iar pisica e condamnată.

Radiaţia corpului negru:
E simplu să te îmbraci în negru

La începuturile teoriei cuantice, alături de spectrele de emisie şi absorbţie ale atomilor, un rol important l-au jucat măsurătorile radiaţiei termice într-o incintă întunecată, aflată la temperatură constantă – ceea ce se numeşte *corp negru.* Ceea ce percepem noi drept căldură sunt vibraţiile infime ale atomilor şi moleculelor. Fiind încărcaţi electric, aceşti constituenţi radiază energie atunci când vibrează: radiaţie termică. Radiaţia într-o incintă închisă poate fi foarte bine controlată, iar în secolul al XIX-lea nu fost obţinute date precise.

La început, aceste observaţii au fost în acord cu ideile clasice privind radiaţia. Experimentatorii au măsurat distribuţia energiei radiaţiei în funcţie de frecvenţă – energia trebuia să crească odată cu frecvenţa, din moment ce atomii şi moleculele vibrează mai intens, ceea ce s-a şi constatat. Apărea însă o problemă gravă: conform calculelor clasice, energia trebuia să crească nelimitat la frecvenţe tot mai mari, depăşind orice limită imaginabilă. Astfel, energia totală, însumată după toate frecvenţele, devenea infinită. Avem aici de-a face cu o problemă oarecum asemănătoare cu creşterea infinită a energiei în singularităţile cosmologice sau în interiorul găurilor negre. Radiaţia corpului negru şi teoria ei cuantică sunt mult mai bine înţelese şi testate experimental decât gravitaţia cuantică, prin urmare e instructiv să vedem cum a fost rezolvată aici problema infiniţilor.

Soluţia, găsită de Max Planck înainte de elaborarea mecanicii cuantice, arată că emisia de energie este de natură discretă. Atomii şi

moleculele din pereţii corpului negru au spectre de emisie discrete şi nu pot emite pachete de energie arbitrar de mari. Ţinând cont de acest lucru – ceea ce Planck a făcut intuitiv, fără să aibă cunoştinţă de fizica cuantică subiacentă – nu mai apare creşterea infinită a energiei la frecvenţe înalte şi rezultă o energie totală finită. Planck s-a bazat în principal pe date precise, care prezentau deja uşoare abateri de la comportamentul clasic prevăzut, iar formula sa se potrivea perfect cu aceste noi observaţii. În 1905, Einstein a explicat formula lui Planck prin existenţa unei distribuţii discrete de energie în radiaţia termică. El a fost deci acela care a introdus particulele de lumină cuantificate – *fotonii.*

Formula lui Planck arată că distribuţia de energie la frecvenţe înalte – lungimi de undă mici ale radiaţiei – se comportă diferit faţă de previziunile clasice. La fel ca stabilizarea atomilor, acest fapt ar putea fi un indiciu pentru o descriere completă a gravitaţiei cuantice, fiindcă energia este, conform relativităţii, echivalentă cu masa, deci este activă gravitaţional. Dacă energia se comportă la lungimi de undă mici sau la distanţe mici diferit faţă de ceea ce prezice teoria relativităţii generale (necuantică), atunci materia ar trebui să determine o altă formă a spaţiului-timp. Curbura spaţiului-timp şi forţa gravitaţională pe care ar implica-o ar fi altele decât cele din soluţiile clasice. Asemenea scări dimensionale extreme ar fi importante mai ales la big bang, când universul era foarte mic, sau în găurile negre. Dacă în aceste condiţii forţa gravitaţională cuantică n-ar mai fi pur atractivă, poate că n-am mai avea de-a face cu o creştere infinită a energiei şi ar apărea situaţii stabile graţie forţelor gravitaţionale repulsive. Numai într-o teorie cuantică a gravitaţiei concretă se va putea vedea dacă lucrurile stau într-adevăr aşa, dar e încurajator să vezi ca două consecinţe independente ale teoriei cuantice – stabilitatea

atomilor şi caracterul finit al radiaţiei corpului negru – sugerează această posibilitate.

Scările Planck:
Despre enormitatea cuantică

Înainte de a ne îndrepta atenţia spre o posibilă teorie cuantică a gravitaţiei, să vedem la ce scări s-ar petrece fenomenele relevante. După cum am mai spus, teoria relativităţii generale este în bun acord cu observaţiile. Nimeni nu se aşteaptă să fie nevoie prea curând de gravitaţia cuantică pentru a explica direct fenomenele observate. Spre deosebire de numeroasele probleme practice dinainte de apariţia mecanicii cuantice, nevoia de a elabora o teorie cuantică a gravitaţiei e de natură pur conceptuală, motivată, de pildă, de dorinţa de a evita problema singularităţilor. Deşi probleme asemănătoare au apărut în fizica clasică înainte de dezvoltarea mecanicii cuantice, ele au fost marginalizate de abundenţa observaţiilor concrete.

Rolul jucat de gravitaţia cuantică pentru observaţii poate fi înţeles dacă ne uităm la scările dimensionale relevante, mai cu seamă la *lungimea Planck* (a nu se confunda cu constanta lui Planck). Deşi Planck nu s-a ocupat de gravitaţia cuantică, el este acela care a introdus această cantitate importantă.[26] A observat că viteza luminii, constanta gravitaţională a lui Newton şi ceea ce avea să se numească constanta lui Planck, prin anumite înmulţiri şi extrageri de radical, permit definirea unei lungimi: lungimea Planck. Prin alte combinaţii, se pot obţine un timp, *timpul Planck,* şi o masă, *masa Planck.* Lucrul era interesant, fiindcă nu era nevoie de măsurarea unei lungimi pentru îi determina viteza luminii, constanta gravitaţională şi constanta lui Planck – şi totuşi, se obţinea o lungime unică prin simple combinaţii matematice. Această legătură poate fi pesemne folosită în

metode fine de măsurare sau ca nouă convenţie pentru unitatea de lungime.

Deocamdată aceste idei nu au jucat vreun rol practic, în parte din cauza dimensiunii extrem de mici a lungimii Planck. În comparaţie cu raza unui atom (0,000000001 metri) sau chiar cu cea a unui nucleu (0,000000000000001 metri), lungimea Planck e infinitezimală. Introducând valorile vitezei luminii, ale constantei gravitaţionale şi ale constantei lui Planck, obţinem aproximativ 0,00000000000000000000000000000000001 metri. Tot atâtea ordine de mărime se află în raportul dintre un metru şi cea mai mică distanţă măsurabilă actualmente – dimensiunea particulelor elementare, aşa cum apare ea în experimentele din acceleratoare – cât se află în raportul dintre această distanţă minimă măsurabilă şi lungimea Planck. Dacă am mări universul aşa încât regiunea Planck să aibă dimensiunea unui electron, atunci electronul ar avea dimensiunea unei mingi de fotbal.

Pentru a obţine valoarea timpului Planck, ne putem gândi că acesta reprezintă durata în care lumina parcurge o lungime Planck. Valoarea e infimă: numărul de intervaluri de *timp Planck* conţinute într-o secundă are 42 de cifre. Masa Planck, de aproximativ un microgram, poate părea mai aproape de mărimile cu care suntem obişnuiţi. Dar şi această valoare e una extremă, dacă o privim ca pe o masă fundamentală, de pildă ca pe masa unei particule elementare, şi nu ca pe cea a unui obiect compus dintr-un număr astronomic de constituenţi.

Ne facem o idee mai clară despre scara Planck dacă luăm în considerare *densitatea Planck,* densitatea corespunzând unei mase Planck aflate într-o regiune cubică având latura de o lungime Planck. Această densitate este echivalentul unui bilion de sori comprimaţi până la dimensiunea unui proton. Deoarece lungimea Planck conţine

constanta lui Planck, esenţială în teoria cuantică, şi constanta gravitaţională, ne aşteptăm ca dimensiunea ei să joace un rol important în combinarea celor două teorii. În cosmologie, gravitaţia cuantică devine de neocolit atunci când, în apropierea singularităţii big bang, universul e comprimat la o densitate de ordinul densităţii Planck. Asemenea argumente dimensionale sunt deseori valabile, cel puţin aproximativ, şi oferă indicii privind teoriile ce urmează să fie elaborate. De pildă, în mecanica cuantică, raza unui atom de hidrogen poate fi estimată într-un mod asemănător, pentru că sarcina şi masa electronului (proprietăţile definitorii ale sistemului), împreună cu constanta lui Planck (impusă de natura cuantică a problemei) determină în mod unic o lungime. Până la un factor doi, această lungime e în acord cu lărgimea funcţiei de undă a stării fundamentale a atomului de hidrogen, aşa-numita *rază Bohr*.

Ne putem lesne da seama de ce nu există deocamdată observaţii care să necesite în mod direct o teorie cuantică a gravitaţiei. Lungimea Planck e incomparabil mai mică decât toate lungimile măsurate până acum. Dacă vom ajunge într-o bună zi să sondăm lungimi de acest ordin de mărime, gravitaţia cuantică şi structura spaţiului-timp implicată de ea vor deveni importante. Aceste argumente trebuie însă tratate cu precauţie, fiindcă se referă la situaţii complicate, în care apar mai mulţi parametri. Dimensiunile atomilor grei, cum e cel de uraniu, cu un număr mare de electroni – în acest caz, 92 nu pot fi estimate prin simple calcule dimensionale. Trebuie oare să înmulţim raza Bohr cu numărul electronilor pentru a obţine raza atomului de uraniu? Sau s-o împărţim la el? Sau să urmăm alt procedeu? E nevoie de o cunoaştere mai amănunţită a fizicii care intervine aici pentru a avea o teorie completă.

Apoi, aşa cum vom vedea mai târziu, alte efecte pot fi amplificate însumând mulţi termeni mici.

Deşi abaterile gravitaţiei cuantice de la relativitatea generală trebuie să fie, la un moment dat din evoluţia cosmică, minuscule, asemenea corecţii se amplifică în cursul expansiunii universului; ele vor fi detectabile mai curând decât ne lasă să întrezărim valoarea lungimii Planck. Acest gen de efecte indirecte a jucat adesea un rol important în descoperirea unor noi fenomene în fizică. Un exemplu bine-cunoscut este mişcarea browniană, folosită pentru dezvăluirea structurii atomice a materiei, în care impactul minuscul al moleculelor din lichid antrenează într-o mişcare dezordonată boabele de polen aflate în suspensie, ceea ce poate fi văzut cu microscopul optic. Ne vom întoarce la acest fenomen în capitolul 8.

Valoarea lungimii Planck, foarte mică, dar nenulă, ne arată că o situaţie cosmologică precum big bang-ul nu poate fi înţeleasă decât în cadrul unei teorii cuantice a gravitaţiei. Dacă întreaga întindere a universului se presupune a se anula la acel moment, prin comparaţie, chiar şi scara Planck ar fi uriaşă. Cu o asemenea teorie am putea analiza problema singularităţii şi posibila existenţă a unor forţe repulsive stabilizatoare. Deşi nu dispunem deocamdată de o teorie completă, putem face câteva predicţii concrete şi avem multe semne încurajatoare.

CAPITOLUL 3.
Un interludiu despre rolul matematicii.
Începe lumea într-o ecuaţie?

Ajuns-am astfel la concluzia tristă:
Unde cuvântu-i frânt, nimic nu mai există.

Stefan George, *Cuvântul*

Relativitatea generală şi mecanica cuantică, luate separat, conduc la numeroase fenomene derutante, ba chiar aparent paradoxale, nu doar pentru un neiniţiat, dar şi pentru un cercetător cu experienţă. O perspectivă limpede e posibilă numai graţie formulării lor matematice, fără de care evaluarea şi înţelegerea acestor teorii ar fi imposibile. Învăţarea şi dezvoltarea lor cere un mare efort, mai cu seamă dacă scopul este elaborarea gravitaţiei cuantice, care trebuie să combine conceptele relativităţii generale şi ale mecanicii cuantice. Însă, odată deprins aparatul matematic, el oferă soluţii riguroase pentru a răspunde la întrebări în faţa cărora intuiţia e neputincioasă.

Începând cu Galileo Galilei, matematizarea fizicii a făcut cu putinţă succese uimitoare, conducând spre noi lumi în sensul propriu, „minunate lumi noi” în cosmologie. Pentru Galilei, matematica este limbajul naturii, indispensabilă în înţelegerea acesteia. Formulele matematice sunt propoziţiile naturii, iar cuvintele ei sunt variabilele

şi operaţiile matematice. „Unde cuvântu-i frânt, nimic nu mai există”: în absenţa matematicii, cunoaşterea ştiinţifică a naturii se rezumă la obiecte direct accesibile simţurilor. În singularităţile spaţiului-timp care apar în relativitatea generală, obiecte, ba chiar şi lumi întregi, se pierd. Distrugerea celei mai importante propoziţii a teoriei, ecuaţia lui Einstein, face imposibil accesul la lumea dinainte de big bang sau la interiorul găurilor negre. Trebuie deci făurit un nou vocabular matematic.

Fenomenele prezise matematic conferă fizicii o nouă forţă. Pe de o parte, teoriile fizice pot explica percepţii senzoriale precum aurora boreală sau albastrul cerului. Teoriile însă pot aduce cu sine şi noi impresii, percepute doar în chip abstract, extinzând astfel domeniul simţurilor noastre – de pildă, în cosmologie, prin big bang şi găurile negre. Asemenea impresii există numai în matematica aflată la baza teoriilor, dar ele trebuie testate în universul real prin observaţii, chiar dacă testele sunt indirecte, tară a fi percepute senzorial nemijlocit. Această combinaţie de rigoare matematică şi confirmare în natură este cea care înalţă fizica deasupra speculaţiilor şi miturilor, făcând-o demnă de încredere.

Matematică doar de dragul ei?
Matemagia

> Pfuel era unul din acei teoreticieni care-şi iubesc atât de mult teoria, încât uită că rostul oricărei teorii este punerea ei în practică; din dragoste pentru teoria sa, el ura practica şi nu voia să ştie de dânsa. De insucces se bucura chiar, pentru că insuccesul – care se datora totdeauna abaterii practicii de la teorie – nu făcea decât să-i dovedească justeţea teoriei sale.
>
> Lev Tolstoi, *Război şi pace*[27]

În ultimii ani, matematica şi-a găsit o existenţă de sine stătătoare în fizică, în special în cercetările de gravitaţie cuantică, încă nesupusă observaţiilor constrângătoare, şi în care consistenţa matematică serveşte drept unic criteriu de selecţie pentru teorii. Aceasta e într-adevăr o condiţie restrictivă, fiindcă nivelul oi ridicat de dificultate nu permite multe formulări consistente de fapt, deocamdată nu s-a găsit nicio formă pe deplin satisfăcătoare. Pe de altă parte, condiţiile de consistenţă sunt greu de evaluat, aşa încât conceptul de frumuseţe intră în scenă ca un criteriu suplimentar. Frumuseţea e mai uşor de sesizat decât consistenţa, fiindcă se bazează pe un proces emoţional chiar şi în cazul fizicienilor, consideraţi de multe ori prozaici. Totuşi, frumuseţea matematică nu se dezvăluie unui ochi neantrenat. Apoi, chiar şi în matematică, frumuseţea se află în ochii celui care priveşte – aşa se face că apar diverse direcţii de cercetare, toate urmărind idealuri diferite şi comunicând cu greu între ele. Şi, mai presus de toate, se pierde din vedere realitatea: „Nu există nicio îndoială că veridicul, în sensul îndrăzneţ şi ultim pe care îl presupune credinţa în ştiinţă, *afirmă astfel o altă lume* decât cea a vieţii, a naturii şi a istoriei; dar în

măsura în care afirmă această «altă lume», nu trebuie atunci să nege opusul ei, lumea aceasta, lumea *noastră?*”[28]

Odată ce ajungem la o asemenea relaţie intimă cu matematica, putem lesne confunda obiectele matematice cu realitatea. În acest sens, John Stachel vorbea despre „fetişizarea” matematicii: „Prin «fetişizarea matematicii» înţeleg tendinţa de a atribui o existenţă de sine stătătoare construcţiilor matematice ale creierului uman.”[29] Uneori, cuvintele ne indică şi criteriile (ştiinţifice sau de altă natură) folosite în elaborarea anumitor teorii. În unele ramuri ale gravitaţiei cuantice, limbajul e cât se poate de expresiv, aşa cum se întâmplă, de pildă, când se spune că rezultatele matematice sunt „magice” sau „misterioase”.[30]

În toate aceste consideraţii e important să ne amintim care scopul ştiinţei: descrierea Naturii; iar Natura are propriul ei simţ estetic. Numai Natura poate decide ce teorii descriu şi prezic cel mai bine comportamentul ei. Următorul pasaj din *Faust* ne arată la ce conduce un accent exagerat pus pe ideile noastre despre frumos în explorarea Naturii:

> DUHUL: Cine mă cheamă?
> FAUST *întorcându-se*: Îngrozitoare faţă!
> DUHUL: Puternic m-ai atras, neîntrerupt,
> La sfera mea prelung ai supt –
> Şi-acum?
> FAUST: Vai, vai, nu-i de-ndurat!
> DUHUL: Cu sufletul la gură m-ai rugat
> S-apar, obrazul să mi-l vezi doreai!
> înduplecat de dorul tău nestins –
> Aicea sunt! Ce jalnic tremur
> Pe tine, supraomul, te-a cuprins?
> Unde-i chemarea? Unde pieptul, ce-n dureri şi bucurie,
> O lume şi-a creat, şi care cu-n cutremur
> Asemeni spiritelor năzuia să fie?
> Faust, unde eşti, al cui e glasul ce m-ajunse?
> Şi care pân’ la mine cu puterea lui pătrunse?

Tu eşti acela, ce împresurat de adierea-mi,
Te zvârcoleşti de teamă-acum
Mai jalnic decât viermele în drum?
FAUST: Alcătuire tu, de flăcări, să mă depărtez
Din faţa ta? Eu sunt, eu Faust, semenul tău!
DUHUL: În valul vieţii şi-al faptei durez,
Mă ridic şi cobor,
Pretutindeni în toate lucrez.
Naştere sunt şi mormânt,
O veşnică mare,
Mereu schimbătoare lucrare,
Viaţă în toate arzând
Pe pământ şi-n văzduh –
La războiul în freamăt al vremii,
Dumnezeirii îi ţes un veşmânt.
FAUST: Tu care lumea largă o cutreieri,
Tu harnic duh,
De tine cât de-aproape eu mă simt!
DUHUL: Tu semeni duhului ce-l înţelegi,
Nu mie! *(Dispare.)*[31]

Ignorarea Naturii, simbolizată de Duhul Pământului, are urmări nefericite nu doar pentru Faust, care încheie un pact fatidic cu Mefisto şi magia lui, dar şi pentru alţii, la început neîmpliniţi. Faust dobândeşte tot mai multă putere, însă pierde din vedere esenţialul.

Utilizarea abuzivă a infinitului:
Şmecheriile fizicii

Ceea ce se mişcă nu se mişcă nici în locul unde e, nici în acela unde nu e.

Zenon, fragment[32]

Noţiunea de infinit este o armă periculoasă în anumite raţionamente matematice, aşa că nu e de mirare că uneori e folosită în mod abuziv. Pentru descoperirea puterii infinitului îl putem erudita pe Zenon, discipolul lui Parmenide din Elea, care a încercat să vină în sprijinul teoriei ontologice a maestrului său. (În afară de această teorie, Parmenide a oferit explicaţii pentru fazele Lunii şi pentru alte fenomene astronomice, fiind astfel unul dintre primii cosmologi importanţi.) Problema lui Zenon ţinea de caracterul îndrăzneţ al teoriei lui Parmenide, care afirma că nu există mişcare şi că percepţia mişcării e o iluzie. În apărarea teoriei sale, Zenon a folosit câteva argumente care, în formularea lor modernă, se bazează pe noţiunea de infinit. El a conceput, de pildă, o cursă între Ahile şi o broască ţestoasă. Spirit sportiv, Ahile acceptă să pornească în spatele mai slabului său concurent. Odată ce începe să alerge, Ahile ajunge repede în punctul unde a luat startul ţestoasa, care, între timp, a mai înaintat puţin. Lui Ahile îi mai ia ceva timp ca să ajungă în acest loc, dar ţestoasa a continuat să se târască. Repetând tot mereu procesul acesta, Ahile n-o ajunge niciodată pe ţestoasă. Dacă Ahile n-o poate depăşi pe ţestoasa cea lentă, mişcarea însăşi nu poate fi decât o iluzie.

Zenon încearcă să ne amăgească. El ştie fără îndoială că, după un timp, Ahile o va ajunge din

urmă pe ţestoasă, căci trebuie să fi asistat la curse, ba poate chiar să fi concurat el însuşi. (Şi o fi vrut pesemne să se răzbune, cu armele minţii, pentru înfrângere. El împarte durata dintre start şi momentul ajungerii din urmă într-un număr infinit de intervaluri din ce în ce mai mici, modificând cu de la sine putere, însă doar în plan mintal, scurgerea timpului. În loc să lase timpul să curgă în mod obişnuit, Zenon sare de la un interval la următorul. Cum intervalele devin tot mai scurte, timpul pe care şi-l închipuie ei se scurge în mod diferit – e încetinit progresiv în raport cu scurgerea lui convenţională. El transformă astfel un interval finit – timpul în care Ahile ajunge din urmă ţestoasa – într-unul infinit. În termeni matematici, efectuează o transformare de coordonate, făcând să corespundă acelui timp finit o valoare infinită. Raţionamentul lui se desfăşoară în timpul astfel obţinut, în care, desigur, nu se ajunge niciodată la capătul timpului infinit. Zenon ignoră (sau ne îndeamnă pe noi s-o facem) faptul că, în felul în care percepem noi cursa, doar timpul convenţional contează, timp în care, după o durată finită, ţestoasa e ajunsă din urmă.

Noţiunea de infinit e periculoasă, dar deseori e prea tentantă pentru a-i rezista, în special în momentele de disperare zenomană – situaţii în care, în ciuda a ceea ce ştii, încerci să construieşti o demonstraţie – se abuzează întruna de infinit în fizică. Idei asemănătoare apar, de pildă, în problema singularităţilor din relativitatea generală. Multe dintre raţionamentele propuse se pot reduce la o transformare a timpului în care duratei finite dintre big bang şi momentul prezent să-i corespundă una infinită. Din perspectiva acestui nou timp, big bang-ul s-a petrecut într-un moment dintr-un trecut infinit îndepărtat – sau, altfel spus, nu s-a petrecut niciodată. Ceea ce ignorăm în acest caz este faptul că noua noţiune de timp, care joacă doar un rol matematic, e irelevantă, spre deosebire

de timpul fizic pe care îl percepem. Un astronaut care cade într-o gaură neagră cu greu se va consola cu faptul că scurtul răstimp în care mai rămâne în viaţă poate fi matematic transformat într-o durată infinită.

Despre ipoteze şi teorii:
Codul de conduită al teoreticianului

> N-am izbutit să aflu pornind de la fenomene cauza acestor proprietăţi ale gravitaţiei şi nu am formulat nicio ipoteză. […] Îmi este de ajuns faptul că gravitaţia există în realitate şi că acţionează după legile pe care le-am explicat.
>
> Isaac Newton

În ciuda tuturor tentaţiilor, matematica nu poate fi izgonită din fizică. În funcţie de tipul de formulare matematică, facem distincţia între *ipoteze* şi *teorii.* Ipotezele au un caracter speculativ şi marchează, de regulă, începutul cercetărilor într-o nouă gamă de probleme şi concepere a ideilor. Teoriile se află pe o treaptă mai înaltă, ele sunt susţinute de numeroase teste independente şi, în cazul ideal, de o sumedenie de observaţii. Teoriile sunt fundamentul fizicii. Ele fac ordine în mulţimea observaţiilor, explică prin imagini fizice fenomene precum expansiunea universului, ba chiar se aventurează să facă noi predicţii. Afirmaţiile cele mai importante ale teoriilor sunt ridicate la rangul de „legi ale naturii", ceea ce nu înseamnă însă că aceste legi şi teoriile care le conţin vor fi etern valabile, căci nimeni nu poate exclude apariţia unor noi observaţii imposibil de explicat prin vreo teorie existentă. Totuşi, teoriile de succes explică imensa majoritate a observaţiilor deja făcute, ele sunt cheia ordinii în fizica cunoscută.

În fizică, matematica a fost aceea care a conferit noţiunii de teorie un statut mult mai înalt decât în limbajul curent. Teoriile se întemeiază pe principii simple, lesne acceptate de fizicienii cu experienţă,

dar ele implică afirmaţii mai puţin evidente, la care de multe ori se ajunge în urma unor calcule laborioase.[33] Spre deosebire de principiile de bază, acestea pot fi supuse testelor experimentale, iar, dacă trec testele, teoriile sunt acceptate; altminteri sunt imediat uitate. În acest sens, relativitatea specială şi cea generală sunt teorii în toată puterea cuvântului.

Ipotezele au un statut mai precar, şi deseori rămâne să fie completate de teorii sistematice – dacă nu cumva sunt între timp dezminţite. O ipoteză care a jucat un rol important în secolul al XIX-lea, pentru a fi apoi infirmată, a fost ideea existenţei eterului – un mediu atotcuprinzător în care se credea că au loc excitaţiile ondulatorii pe care noi le percepem drept lumină. Conform acestei ipoteze, razele de lumină care se propagă în diferite direcţii pe Pământ – orientate deci diferit în raport cu mişcarea Pământului prin eterul care umple tot spaţiul – ar trebui să se deplaseze cu viteze diferite. Au fost efectuate mai multe experimente pentru a pune în evidenţă aceste modificări; ale vitezei, în speranţa de a se obţine informaţii privind eterul. În cele din urmă, în 1887, Albert Michelson şi Edward Morley au conchis că lumina se deplasează cu aceeaşi viteză în toate direcţiile, dovedind astfel inconsistenţa noţiunii de eter. Puţin mai târziu, această observaţie şi-a găsit o explicaţie naturală în cadrul relativităţii speciale. Un exemplu de ipoteză confirmată este cea a lui Einstein după care lumina e alcătuită din particule, în acea vreme, pe la 1905, nu era acceptată ideea că materia e alcătuită din atomi; pentru mulţi fizicieni, existenţa fotonilor trebuie să fi părut absurdă. Deşi Einstein a dedus, pornind de la această ipoteză, formula lui Planck pentru radiaţia corpului negru, presupunerea în sine rămânea să fie confirmată. Abia mai târziu ipoteza s-a transformat într-o teorie, culminând cu *electrodinamica cuantică* modernă ca teorie a

fotonilor şi a interacţiilor lor cu materia încărcată electric.

Ceea ce numim acum gravitaţie cuantică nu este încă propriu-zis o teorie, deşi a trecut cu succes multe teste independente (ce-i drept, doar matematice). Lipseşte demonstraţia deplinei consistenţe, şi nu există vreo observaţie în sprijinul ei (după cum nu există nici vreuna care s-o invalideze). Totuşi, aceste idei articulate nu sunt simple ipoteze, şi, de dragul simplităţii exprimării, sunt deseori numite teorii – sau uneori, cu un termen mai puţin îndrăzneţ, *ipoteze de lucru.* Tot ce s-a făcut până acum ui gravitaţia cuantică, inclusiv aspectele prezentate în această carte, se află la graniţa dintre ipoteză şi teorie în toată puterea cuvântului, şi are un caracter speculativ. Statutul acesta va putea fi schimbat doar prin observaţii, eventual prin unele despre care vom vorbi în continuare.

CAPITOLUL 4.
Gravitaţia cuantică.
Încercarea de a combina totul

Înainte de 1928, când Paul Dirac încerca să combine relativitatea specială cu mecanica cuantică, nu avea de răspuns nici unor probleme conceptuale grave, nici unor rezultate experimentale. El înţelesese că cele două teorii – relativitatea specială a lui Einstein şi formularea mecanicii cuantice dată de Schrödinger – funcţionau bine în domeniul lor de valabilitate, dar erau incompatibile. Ecuaţia lui Schrödinger, care descrie evoluţia în timp a funcţiei de undă, nu ia în considerare transformabilitatea relativistă a spaţiului şi timpului recunoscută de Einstein şi validată de observaţii. O perspectivă globală, coerentă nu poate tolera existenţa teoriilor incompatibile, aşa încât Dirac s-a apucat să reformuleze relativist ecuaţia lui Schrödinger.

În fizica prerelativistă, energia cinetică a unui corp în mişcare este proporţională cu pătratul vitezei lui. Orice şofer ştie asta, pentru că distanţa de care are nevoie ca să oprească maşina, transformând energia cinetică în căldura degajată în discurile de frână, nu creşte liniar, ci cu pătratul vitezei. Prin urmare, consecinţele unei ciocniri la viteza de 100 km/h nu sunt duble faţă de cele ale unei ciocniri la 50 km/h, ci, din nefericire, mult mai grave.

În relativitatea specială, energia se comportă în felul acesta doar la viteze mici. Altminteri, trebuie ţinut cont de faptul că, în afară de mişcare, şi masa

contribuie la energie, conform celebrei formule a lui Einstein care spune că energia este masa înmulţită cu viteza luminii la pătrat. Apoi, energia şi viteza (sau, mai exact, impulsul, care e produsul dintre masă şi viteză) se pot transforma una într-alta, aşa cum am văzut că se întâmplă cu spaţiul şi timpul.

Spre deosebire de ecuaţia lui Schrödinger, noua ecuaţie a lui Dirac foloseşte relaţii relativiste şi ia în considerare pătratul energiei. Însă, pătratul unui număr nu depinde de semn, aşa cum depinde numărul: minus unu înmulţit cu minus unu e totuna cu unu înmulţit cu unu. Pentru fiecare soluţie a ecuaţiei lui Schrödinger există mereu două soluţii ale ecuaţiei lui Dirac, care diferă prin semnul energiei şi, poate, şi prin cel al sarcinii, dar celelalte proprietăţi ale lor, de pildă masa, sunt identice, lina dintre credinţele de nezdruncinat în fizica teoretică este că fiecare soluţie trebuie fie să intre în contradicţie cu un principiu matematic, fie să corespundă unui lucru din realitate. Dirac a prezis astfel existenţa unei noi clase de fenomene, doar combinând matematic relativitatea specială cu mecanica cuantică: fiecărei particule cunoscute, cum e, de pildă, electronul, trebuie să-i corespundă o antiparticulă, având aceeaşi masă, dar sarcină cu semn schimbat. Când şi-a publicat Dirac ecuaţia, asemenea particule nu fuseseră observate, deci predicţia lui era cât se poate de riscantă. (Se spune că a ezitat să se exprime tranşant.) La scurt timp însă, în 1933, Carl Anderson a detectat pentru prima oară antimateria sub forma pozitronilor (antiparticulele electronilor), pentru ca mai târziu această ispravă să fie repetată şi pentru alte particule cunoscute. Corecţiile aduse de ecuaţia lui Dirac faţă de cea a lui Schrödinger pot fi acum măsurate cu mare precizie, de exemplu pentru frecvenţele luminii emise sau absorbite de hidrogen.

Dirac a ajuns să descopere o nouă lume de fenomene doar combinând matematic două teorii. Ne confruntăm astăzi cu o problemă similară, dar mult mai complicată matematic, în încercarea de a combina relativitatea generală cu teoria cuantică. Ce noi lumi va dezvălui o asemenea combinaţie? Relativitate specială determină mişcarea particulelor în spaţiu-timp, în vreme ce relativitatea generală descrie comportamentul spaţiului-timp însuşi. Ar trebui deci să ne aşteptăm ca o combinaţie coerentă a relativităţii generale şi a fizicii cuantice să dezvăluie nu o nouă materie, ci noi regiuni ale spaţiului-timp sau noi părţi ale universului.

Pentru a înţelege pe deplin spaţiul-timp şi universul – inclusiv regiunile pe care relativitatea generală le poate reprezenta doar ca singularităţi avem neapărat nevoie de o teorie cuantică a gravitaţiei. Abia atunci vom obţine o descriere valabilă a stărilor de densitate înaltă, ca în cazul big bang-ului sau al găurilor negre. Nu dispunem însă de o teorie completă, ci doar de diferite abordări, fiecare cu avantajele şi dezavantajele ei. Chiar şi principiile lor fundamentale se deosebesc. Această diversitate se explică prin faptul că fundamentele matematice ale relativităţii generale şi teoriei cuantice, precum şi înţelegerea principiilor lor, pot fi combinate în multe feluri. Nu ştim deocamdată care dintre combinaţiile propuse este cea corectă – sau dacă nu cumva trebuie să urmăm o altă cale pentru a ne atinge scopul.

Abordările gravitaţiei cuantice:
Puterea stă în diversitate

Pentru un domeniu vast, netestat experimental, cum e gravitaţia cuantică, nu-i de mirare că au fost urmate o mulţime de căi foarte diferite. Numărând cercetătorii care lucrează în domeniu şi publicaţiile, găsim că cele mai umblate căi sunt *teoria corzilor* şi *gravitaţia cuantică cu bucle*, care într-adevăr se deosebesc mult una de alta. În afară de acestea două, propuneri interesante legate de gravitaţia cuantică, precum teoria twisterilor, geometria necomutativă, mulţimile cauzale şi triangulaţiile dinamice cauzale, sunt urmate de mai puţini cercetători, iar progresul în aceste direcţii e mai lent. Multe dintre ideile esenţiale ale gravitaţiei cuantice pot fi deja ilustrate prin teoria corzilor şi gravitaţia cuantică cu bucle, iar asupra lor ne vom concentra.

Teoria corzilor:
Cea mai bogată simfonie

Teoria corzilor[34] s-a bucurat de cel mai mare interes. Pornind de la idei mai vechi din fizica particulelor, punctul ei forte este descrierea cuantică a excitaţiilor precum undele gravitaţionale pe o scenă spaţio-temporală fixă. În teoria corzilor există obiecte de tip particulă, *gravitoni,* care transportă forţa gravitaţională în pachete, la fel cum fotonii transportă lumina. Acesta e însă doar un rezultat secundar, căci ideea de bază a teoriei corzilor este de fapt mult mai radicală: particulele nu mai sunt considerate puncte sau bile solide minuscule, ci sunt privite ca excitaţii ale unui unic obiect elementar – coarda. Aşa cum coarda unui instrument muzical poate genera diferite sunete prin diferitele în moduri de vibraţie, o coardă fundamentală poate oscila în mai multe feluri. După cum sunetele se deosebesc între ele prin diferitele lor frecvenţe, vibraţiile corzilor au diferite energii sau mase. În principiu, ele pot explica masele observate ale particulelor elementare, dacă rezultatele calculelor se potrivesc cu datele experimentale.

Reducând toate fenomenele din fizica particulelor la un singur obiect, teoria corzilor promite să unifice toate forţele fundamentale cunoscute – gravitaţia, electromagnetismul şi interacţiile tare şi slabă – în formula unei singure forţe. N-ar mai exista concepte diferite precum spaţiul-timp ca mediu al gravitaţiei şi câmpul electromagnetic ca mesager al forţei electrice, ci un singur obiect, din ale cărui vibraţii ar apărea toate forţele şi particulele materiale asupra cărora acestea acţionează: coarda.

Unificarea diferitelor teorii şi forţe a jucat un rol esenţial în dezvoltarea fizicii, de pildă atunci când Maxwell a combinat fenomenele electrice şi cele magnetice, între care la început nu se întrezărea vreo legătură, pentru a crea teoria electromagnetismului. Din asemenea teorii combinate au rezultat predicţii privind noi fenomene, care puteau fi folosite în tehnologie sau ca teste independente ale teoriilor. Un exemplu de aplicaţie a unificării lui Maxwell sunt undele electromagnetice, care se bazează pe influenţa reciprocă a excitaţiilor electrice şi magnetice şi care nu pot fi înţelese decât în cadrul unei teorii unificate a celor două forţe: un câmp electric variabil generează un câmp magnetic, iar un câmp magnetic variabil generează un câmp electric. Prin urmare, o excitaţie variabilă, de pildă curentul într-o antenă, se poate propaga în spaţiu – în unda electromagnetică, energia electrică se transformă în energie magnetică, apoi din nou în energie electrică şi tot aşa. Fără combinarea excitaţiilor electrice şi magnetice, acest lucru n-ar fi posibil şi n-am avea acces la aplicaţii cum sunt radioul şi tehnologiile cu raze X.

Teoria corzilor încearcă acum să unifice toate forţele şi particulele reducându-le la o coardă. Se pot construi în diverse feluri instrumente muzicale cu coarde, iar deosebirile de timbru pot fi sesizate şi de profani. În mod asemănător, în fizică pot fi construite diferite teorii ale corzilor, cu excitaţii diferite. Masele sau interacţiunile particulelor prezise de aceste teorii ar putea fi puse în evidenţă prin experimente la energii înalte, de pildă la Large Hadron Collider (LHC), la CERN, lângă Geneva, care a fost pus în funcţiune în 2008, pentru a fi repornit în 2009. Uneori însă nici nu e nevoie de experimente pentru a respinge o teorie: stabilitatea atomilor depinde de masele protonilor şi neutronilor, îngustând astfel mult spectrul valorilor pe care le pot lua acestea.

Muzica se naşte din diferitele tonuri la diferite instrumente. Mai prozaici, fizicienii teoreticieni sunt preocupaţi în primul rând de simplitate şi de eficienţă în descrierea naturii: în locul mai multor teorii e de preferat unitatea, după cum o demonstrează electromagnetismul lui Maxwell. Teoria corzilor urmează acest ideal nu doar prin forţa potenţială a legilor ei, ci şi prin deducţiile lor matematice extrem de elegante. Nu avem aici de-a face cu o întreagă orchestră formată din diverse instrumente de coarde, ci doar cu însăşi teoria corzilor drept solist. După ani îndelungaţi de cercetare, s-a dovedit că toate aranjamentele posibile de corzi fundamentale sunt înrudite matematic. Diferitele tonuri nu conduc la fizici diferite, ci sunt doar perspective matematice diferite asupra aceleiaşi fizici.

Următoarea afirmaţie are un grad de generalitate fără precedent: toate fenomenele din gravitaţie şi din fizica particulelor pot fi descrise printr-o unică teorie, fără a le mai permite teoreticienilor vreo libertate. Vorbind despre teoria corzilor folosim deseori termenul „teorie universală” *(theory of everything* – TOE). Presupunând că stăpânim matematica necesară, tot ce este de interes poate fi calculat, pentru ca teoria să poate fi apoi testată experimental. În principiu, ea poate fi folosită pentru a prezice noi fenomene, de pildă cele care se petrec la big bang.

Spre deosebire de teoria lui Maxwell, pentru teoria corzilor testele experimentale şi aplicaţiile tehnologice nu sunt deocamdată cunoscute. Unul dintre motive este complexitatea matematicii care stă la baza ei. Pe de o parte, această complexitate explică unicitatea teoriei şi puternica atracţie pe care o exercită deopotrivă asupra matematicienilor şi a fizicienilor; pe de altă parte, teoria corzilor pare o construcţie prea elaborată, care (cel puţin, până acum) nu-şi vădeşte utilitatea practică. Consistenţa matematică impune ca teoria să

apeleze la mai mult de trei dimensiuni spaţiale, cel mai adesea la nouă. Doar trei dintre ele – înălţimea, profunzimea şi lăţimea sunt sesizabile, celelalte şase fiind minuscule. Aşa cum, privit de la mare distanţă, un furtun poate părea o linie (e unidimensional), un spaţiu 9-dimensional cu şase dimensiuni minuscule ar arăta ca unul tridimensional, şi doar la scară mică am observa dimensiunile suplimentare. Din moment ce efectele gravitaţiei cuantice e de aşteptat să fie sesizabile la distanţe de ordinul lungimii Planck, dimensiunile suplimentare ar putea fi într-adevăr suficient de mici pentru a fi inobservabile, dar se discută despre posibilitatea punerii lor în evidenţă la energii înalte. Prin urmare, teoria corzilor conduce într-adevăr spre noi fenomene care ar putea s-o facă testabilă.

Dimensiunile suplimentare aduc însă cu sine o dificultate. Chiar dacă ecuaţiile matematice ale teoriei corzilor pentru un spaţiu-timp cu multe dimensiuni sunt complicate, putem estima cât de bogată ar fi mulţimea tuturor soluţiilor. Putem contabiliza acele soluţii având proprietăţi care se află într-un acord aproximativ cu ceea ce vedem în universul nostru. Din păcate, rezultatul este un număr inimaginabil de mare – există mai multe soluţii decât numărul total de protoni din univers. Această uriaşă varietate face ca teoria, cu toată frumuseţea şi unicitatea ei din perspectivă matematică, să fie inutilizabilă în explicaţiile fizice. Nu există nicio bază pentru predicţii concrete, fiindcă asupra fenomenelor necunoscute nu se impune nicio restricţie. O asemenea teorie ar fi în sens propriu o teorie universală, o teorie despre tot, fiindcă totul se poate întâmpla în cadrul ei.

Chiar dacă teoria e unică şi nu dă naştere diferitelor timbruri, aşa cum fac instrumentele muzicale, acest avantaj e anulat de potopul soluţiilor. Există, ce-i drept, un singur instrument,

dar claviatura lui e enormă. Nenumărate piese pot fi cântate la el, şi nimeni nu ştie ce compoziţie corespunde lumii noastre sau cum ar putea fi determinat acest lucru. Poate că ne apar atât de multe soluţii doar pentru că nu au fost stabilite deocamdată toate condiţiile matematice pe care trebuie să le satisfacă teoria corzilor. Cercetătorii se împart în două tabere: cei care cred neabătut în unicitatea teoriei corzilor şi a soluţiilor ei şi continuă să caute condiţiile de consistenţă care lipsesc, şi cei care, urmând exemplul lui Leonard Susskind, fac din necesitate o virtute. Dacă nu poate fi găsită o soluţie unică în conformitate cu universul observat de noi, susţin aceştia din urmă, cel puţin soluţia „cea mai probabilă" ar trebui să fie în acord cu lumea noastră.[35] Astfel ajungem însă în faţa unei noi dificultăţi: trebuie mai întâi definit matematic gradul de probabilitate, iar, dacă aceasta e cu putinţă, trebuie apoi găsit modul de a recunoaşte probabilitatea din observarea doar uneia dintre toate lumile posibile. Ultimele capitole ale cărţii de faţă sunt dedicate problemei unicităţii teoriilor şi soluţiilor. Să ne îndreptăm acum spre teoria alternativă care atacă frontal natura cuantică a scenei spaţio-temporale.

Gravitaţia cuantică cu bucle:
Atomi de spaţiu şi întuneric

La războiul în freamăt al vremii,
Dumnezeirii îi ţes un veşmânt.

Goethe, *Faust*[36]

Materia este alcătuită din atomi. Dacă într-o regiune din paţiu-timp nu e prezent niciun atom, avem de-a face cu starea de vid. În fizica modernă, vidul joacă un rol important – ca fundament pe care se aşază toate configuraţiile materiei. Pornind de la o regiune de vid şi introducând în ea atom după atom, pot fi formate toate construcţiile complexe. (Acesta e un experiment mintal, dar, cu nanotehnologiile actuale, pot fi manevraţi atomi individuali.)

Un atom de materie are o energie cu care contribuie la materia pe care o alcătuieşte. Energia poate creşte pe două căi: fie adăugăm mai mulţi atomi, fie aducem atomii existenţi în stări de energie mai înaltă (excitaţie). Urmăm a doua cale atunci când încălzim un material sau trimitem un fascicul de lumină asupra lui. Din moment ce energia totală se conservă, atomii trebuie deplasaţi dintr-o regiune într-alta, dar nu pot fi creaţi din nimic, iar lumina sau căldura trebuie să provină de la o sursă externă. Toate acestea decurg din teoria cuantică a materiei, al cărei limbaj este *teoria cuantică a câmpului.* Dacă mecanica cuantică descrie particulele individuale şi superpoziţiile lor posibile, teoria cuantică a câmpului include interacţiile dintre mai multe particule.

În gravitaţia cuantică trebuie să aplicăm teoria cuantică direct spaţiului, timpului şi raporturilor de

reciprocitate dintre ele, aşa cum apar ele în relativitatea generală. Conform gravitaţiei cuantice cu bucle, şi spaţiul are o structură atomică. Atomii de spaţiu sunt entităţi abstracte, nu vizibile. Unele dintre proprietăţile lor pot fi cel mai bine descrise atribuindu-li-se o extindere unidimensională sub formă de buclă, iar nu sub formă sferică, de aici numele de *gravitaţie cuantică cu bucle*. În această descriere atomică, volumul oricărei regiuni spaţiale poate creşte doar în mod discret, în trepte, adăugând sau excitând atomi de spaţiu. La fel ca în cazul energiei, avem de-a face cu două căi diferite de creştere a volumului, însă dinamica proceselor e alta, din moment ce, dacă energia se conservă pentru atomii de materie, volumul nu se conservă. Volumul total poate creşte fără să fie nevoie de vreo sursă exterioară, aşa încât volumul întregului univers poate creşte de la sine. În termeni generali, interacţiunea dintre spaţiu, timp şi, eventual, materie într-un univers aflat în expansiune face ca atomii de spaţiu să fie excitaţi şi, odată ce devin suficient de mari, să se dividă, formându-se astfel un nou atom de spaţiu.

O descriere teoretică riguroasă are nevoie de o bază de pornire. Putem privi această bază a gravitaţiei cuantice drept analogul vidului de materie, dar lucrurile sunt mult mai complicate. În absenţa atomilor de spaţiu, nu există niciun fel de spaţiu, şi totuşi avem de-a face cu o stare fizică. Ce e această stare? Ea diferă de spaţiul gol sau vidul de materie, aşa cum este el realizat în bună măsură în spaţiul extraterestru, căci acesta, deşi lipsit de materie, are totuşi spaţiu – o întindere şi un volum. Nu se găseşte mare lucru în univers între galaxii, şi totuşi există ceva: un spaţiu imens. În gravitaţia cuantică cu bucle, orice volum, mic sau mare, e dat de atomii de spaţiu; când îi înlăturăm pe toţi, nu mai rămâne niciun volum. Într-o stare de vid din gravitaţia cuantică, nu există nici măcar spaţiu sau volum. Vidul gravitaţiei cuantice cu bucle este un

gol de neconceput: nici sunet, nici lumină, nici materie, nici spaţiu; doar timp, ca o speranţă licărind slab, uitată în acest deşert.

Putem privi vidul spaţial din gravitaţia cuantică cu bucle în analogie cu anumite stări din teoriile cuantice ale materiei, dar el nu corespunde vidului de materie. Chiar dacă e vorba de o stare total nepopulată, poate fi comparată mai curând cu starea de temperatură infinită. Această observaţie l-a făcut pe fizicianul Klaus Fredenhagen s-o numească *stare infernală.*

Orice teorie a gravitaţiei cuantice care tratează complet spaţul şi timpul trebuie să se confrunte cu „starea infernală". După cum vom vedea mai târziu, această stare are o mare importanţă în problema singularităţii, unde spaţiul a colapsat cu totul. Nu e deci de mirare că gravitaţia cuantică cu bucle, cea mai cuprinzătoare teorie de până acum a acestei stări cu desăvârşire vide, a făcut progrese însemnate în înţelegerea singularităţilor. Gravitaţia cuantică cu bucle este, de asemenea, mai întunecată şi pesemne mai profundă decât armonioasa şi vesela teorie a corzilor. Chiar şi regiuni în care se află numeroşi atomi de spaţiu păstrează amintirea vidului absolut, a „stării infernale" din care provin. Există un mare risc teoretic: dacă starea de bază se dovedeşte a fi incorectă, acest păcat originar poate nimici teoria.

Comparaţie: mere şi portocale

Teoria corzilor şi gravitaţia cuantică cu bucle sunt aliaţi aproximativi care împărtăşesc acelaşi scop, dar au ambiţii şi credinţe diferite. Deşi sunt teorii ştiinţifice, credinţele apar sub forma principiilor. Teoria corzilor se bazează pe concepte provenind din fizica particulelor, mai cu seamă pe acelea de simetrii abstracte şi de relaţii ascunse între diferitele tipuri de particule şi forţe. De pildă, interacţia electroslabă se bazează pe o simetrie care leagă electronii şi neutrinii, două tipuri de particule, la prima vedere, complet diferite. În mod asemănător, teoria corzilor propune simetrii care leagă forţa gravitaţională de altele cunoscute, cum ar fi forţa electromagnetică. Pe de altă parte, gravitaţia cuantică cu bucle îşi extrage principiile din îndelungata tradiţie a geometriei spaţiului, a cărui structură e considerată mai importantă pentru înţelegerea universului în întregul său decât proprietăţile materiei pe care acesta o conţine. Primele versiuni ale unor asemenea principii au apărut în Antichitatea greacă, pentru a fi dezvoltate într-o formă modernă de matematicieni precum Carl Friedrich Gauss şi Bernhard Riemann, şi a fi apoi folosite de Einstein la formularea relativităţii generale. Pentru o teorie cuantică a gravitaţiei este o sarcină firească, dar dificilă, să extindă aceste concepte la un spaţiu atomic, combinându-le cu elemente ale teoriei cuantice.

Ambiţiile sunt strâns legate de credinţe, şi nu e întotdeauna simplu să-ţi dai seama care din ele au avut întâietate. Ambiţia dominantă a teoriei corzilor e unificarea, o credinţă evident monoteistă. Toate particulele şi forţele dintr-un domeniu spaţio-temporal sunt reduse la vibraţiile unui singur obiect – coarda. Din moment ce

gravitaţia este una dintre forţe, iar teoria corzilor e o teorie cuantică, această abordare trebuie să conducă în cele din urmă la o teorie cuantică a forţei gravitaţionale. Structura spaţiului-timp însă, deşi adusă indirect în contact cu lumea cuantică, rămâne în mare măsură neatinsă. În ce priveşte spaţiul-timp, teoria corzilor nu merge mult mai departe decât relativitatea generală. Doar gravitaţia cuantică cu bucle tratează spaţiul-timp şi materia pe picior de egalitate, fără a realiza totuşi unificarea completă. În cadrul ei, conceptele teoriei cuantice sunt aplicate direct spaţiului şi timpului, rezultând o structură atomică asemănătoare celei a materiei. Însuşi spaţiul-timp, scena pe care se mişcă materia, e construit în cadrul gravitaţiei cuantice cu bucle, în vreme ce, în teoria corzilor, el este în mare măsură luat ca atare (figura 10). Dacă teoria corzilor e monoteistă, gravitaţia cuantică cu bucle e panteistă. Totul – spaţiu, timp şi materie – este o buclă discretă care fluctuează, iar relaţiile ei interne sunt ceea ce percepem drept schimbare.

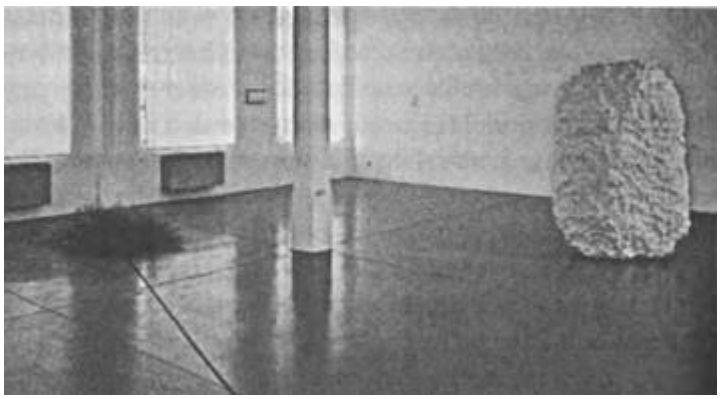


Figura 10. *Multe teorii cuantice ale gravitaţiei descriu proprietăţile spaţiului-timp prin obiecte unidimensionale, cum sunt corzile din teoria corzilor şi buclele din gravitaţia cuantică cu bucle. Semnificaţia acestor obiecte unidimensionale diferă însă în cele două cazuri. În teoria corzilor, corzile asigură excitaţiile undelor de materie sau gravitaţionale într-un spaţiu-timp dat, după cum e simbolizat de piatra albă din dreapta, în jurul căreia e înfăşurat un fir. În schimb, gravitaţia cuantică cu bucle încearcă să*

construiască totul, inclusiv spaţiul-timp însuşi, pornind de la bucle unidimensionale (stânga) – o sarcină mult mai complexă. (Sculptură de Gianni Caravaggio, Catturatore di volumi [Captator de volum], *2005. Fotografie de Paolo Mussat Sartor.)*

Din punct de vedere matematic, cele două teorii sunt în aceeaşi măsură dificile şi sofisticate, dar diferă mult. Ambele sunt geometrice – trăsătură definitorie a fizicii moderne dar teoria corzilor foloseşte versiuni continue ale geometriei, în timp ce gravitaţia cuantică cu bucle se bazează pe o versiune discretă. Ambele fac apel la teoria cuantică a câmpului, limbajul universal nu doar al fizicii particulelor, dar şi al fizicii materiei condensate, însă în versiuni diferite, în funcţie de perspectiva fiecăreia asupra spaţiului-timp: teoria câmpului *în* spaţiu-timp (teoria corzilor) şi teoria câmpului *a* spaţiului-timp (gravitaţia cuantică cu bucle). În ambele teorii se cunosc câteva modele ce pot fi tratate exact – repere care limpezesc conceptele şi aşteptările dar ele se referă la situaţii diferite, aşa încât nu oferă o bază pentru compararea abordărilor.

Diferenţa cea mai importantă ţine însă de încărcătura lor suplimentară care nu se leagă direct de scopul propus. Gravitaţia cuantică cu bucle se aplică direct spaţiului-timp aşa cum e cunoscut în relativitatea generală, dar înzestrat cu legi cuantice. Această combinaţie are câteva consecinţe noi şi deseori surprinzătoare, permiţând teoriei să meargă mult dincolo de relativitatea generală, însă aceste noi fenomene derivă din principiile de bază, nu sunt adăugate cadrului preexistent. Pentru ca teoria corzilor să poată fi formulată consistent, ea are nevoie de mai multe dimensiuni decât cele trei pe care le cunoaştem din experienţa noastră. Ea prevede existenţa mai multor particule decât observăm deocamdată şi se bazează în mod esenţial pe un nou tip de (super)simetrie ce leagă diferitele tipuri de particule. Aceste concepte au

fost introduse din raţiuni pur teoretice – ceea ce s-ar putea dovedi o intuiţie revoluţionară, dar şi falsă. Pericolul este ca un input suplimentar prea mare, aşa cum e necesar în anumite modele ale teoriei corzilor, să împiedice teoria să facă previziuni, din moment ce ea poate cuprinde aproape totul.

Cât priveşte problema singularităţilor şi a big bang-ului, ambele abordări o consideră esenţială şi sugerează soluţii pentru rezolvarea ei. Dar, şi aici, gama largă de posibilităţi ale teoriei corzilor face ca lucrurile să fie mai puţin precise decât ne-am dori. Există în cadrul ei diverse propuneri de abordare a problemei singularităţilor: ideea că lumea noastră se ciocneşte cu alta, dintr-un spaţiu cu mai mult de patru dimensiuni (scenariul cepirotic elaborat de Justin Khoury, Burt Ovrut, Paul Steinhardt şi Neil Turok), big bang-ul ca un grup puternic confinat de particule deplasându-se mai repede decât lumina (condensatul tahionic propus de Ashoke Sen şi folosit apoi în cosmologie de Eva Silverstein şi Liam McAllister) sau câteva versiuni ale modelelor oscilante, oarecum asemănătoare cu ceea ce vom întâlni în cosmologia gravitaţiei cuantice cu bucle. În niciunul dintre aceste cazuri nu s-a realizat o tranziţie completă prin singularitatea big bang. Existenţa acestei mulţimi de scenarii ne face să nu putem deocamdată întrezări cum ar putea rezolva teoria corzilor problema singularităţilor. Pe de altă parte, gravitaţia cuantică cu bucle abordează direct structura spaţiului-timp, şi o face cu mult mai mare claritate (deşi încă incomplet).

Înainte de a vorbi despre consecinţele cosmologice, se cuvine să prezentăm şi alte concepte ale gravitaţiei cuantice.

Gravitaţia cuantică cu bucle:
Luminând întunericul

Istoria şi dezvoltarea gravitaţiei cuantice cu bucle e fascinantă – un studiu de caz ilustrând metodele şi riscurile fizicii teoretice. Câteva contribuţii importante s-au dovedit a fi incorecte, şi totuşi au influenţat multe realizări cruciale. Deseori entuziasmul a fost imediat urmat de înţelegerea limitelor rezultatelor obţinute. Aflaţi în faţa unui vast domeniu neexplorat şi deplin conştienţi de importanţa subiectului, pionierii teoriei au demonstrat un curaj remarcabil. Când au încercat să aplice metodele tradiţionale, care fuseseră folosite în cazul materiei, la conceptul mai profund de spaţiu-timp, s-au izbit la început de dificultatea de a găsi o bază de sprijin solidă şi calea de urmat. De unde pornim şi încotro ne îndreptăm? În aceste etape iniţiale, fiecare decizie îşi va pune amprenta asupra dezvoltării ulterioare a domeniului.

Începuturile: Jocuri mintale

Primii cinci ani ai teoriei au fost extrem de interesanţi. Cercetătorii angajaţi în această aventură au avut de înfruntat condiţii extreme. În faţa lor se deschideau o mulţime de căi, unele conducând spre succes, dar cele mai multe spre eşec, iar fiecare presupunea ani de zile de calcule, pentru ca abia la urmă să se vadă unde duc. Primii paşi trebuiau deci aleşi cu toată atenţia. Chiar şi pentru un fizician teoretician e greu de îndurat dubla incertitudine a unor cărări ştiinţifice necunoscute şi a unei cariere nesigure.

Fizicienii teoreticieni nu sunt cu toţii născuţi egali, puţini dintre ei se angajează în etapa iniţială a unui nou domeniu. Peripeţiile anilor de început ai gravitaţiei cuantice cu bucle au scos în evidenţă două tipuri de teoreticieni: unii, cu înclinaţii spre fizică, preocupaţi de înţelegerea lumii, alţii, cu înclinaţii, spre matematică, preocupaţi de descrierea ei. Cele două clase se împart, la rândul lor, în două: categoria inovatorilor şi cea a celor care consolidează, dând substanţă intuiţiilor vagi. Polii acestei duble dualităţi pot fi numiţi, pe de o parte, fizicianul *empirist* şi fizicianul *conceptualul*, iar pe de alta, matematicianul *constructor* şi matematicianul *analist.*

În 1990, Carlo Rovelli şi Lee Smolin au conceput ideea de bucle gravitaţionale, dând astfel numele domeniului.[37] Conceptul de buclă ca atare nu era nou, el fusese folosit în teoriile cuantice ale forţelor, cum este cea electromagnetică. În aceste teorii, buclele nu apar ca un concept fundamental, ci ca un procedeu util pentru aproximare. În loc să considerăm o mărime, de pildă câmpul magnetic, în toate punctele din spaţiu, luăm în considerare

doar efectul ei cumulativ de-a lungul unei curbe.[38] La fel ca atunci când aproximăm o curbă complicată prin linii drepte, descrierea matematică poate fi mult simplificată şi poate conduce la o rezolvare cu ajutorul calculatorului.

Ideea de buclă nu era nouă, dar în mâinile lui Rovelli şi Smolin a devenit cu adevărat revoluţionară. În gravitaţie, buclele nu sunt aproximaţii, ci oferă o descriere completă, devin fundamentale. Cheia pentru a înţelege asta e dată de *covarianţia generală,* conceptul de bază al relativităţii generale, care afirmă că nu există poziţii absolute în spaţiu, ci contează doar relaţiile dintre diferitele obiecte. Schimbarea poziţiei buclelor nu are efecte atunci când ele descriu gravitaţia, în vreme ce, dacă sunt folosite pentru a descrie alte forţe, starea se schimbă. Tot ce contează sunt relaţiile dintre diferitele bucle, de pildă felul în care sunt înnodate sau legate între ele. Rezultă o imagine complexă, dar elegantă, în care spaţiul e ţesut din obiecte unidimensionale descrise matematic de buclele lui Rovelli şi Smolin.

De aici cei doi fizicieni au dedus şi alte consecinţe. Suprafaţa şi volumul regiunilor spaţiale nu pot lua valori arbitrare, ca în geometria tradiţională, ci doar anumite valori discrete. Valorile permise pentru suprafeţe şi volume formează reţele sau spectre în mulţimea tuturor numerelor, şi doar valorile din nodurile reţelelor se pot realiza. Natura atomică a spaţiului este astfel stabilită matematic: regiunile pot creşte doar prin adăugarea unor atomi spaţiali de dimensiuni bine determinate însumarea diferitelor volume atomice conduce la mulţimile de reţele calculate de Rovelli şi Smolin. O regiune care creşte dinamic, de pildă o parte din universul în expansiune, e supusă unor legi care determină cum au loc interacţiunile atomice. Rovelli şi Smolin au formulat, de asemenea, o primă versiune a acestor reguli pentru

schimbul de atomi spaţiali, extrem de complicată, dar părând să funcţioneze.

Când au început să cerceteze diferitele forme ale acestor reguli rezolvând ecuaţiile matematice de bază, entuziasmul a crescut. Deşi în relativitatea generală nu se cunosc multe soluţii concrete pentru spaţiu-timp, Rovelli şi Smolin au găsit imediat infinit de multe soluţii pentru regulile atomice enunţate de ei. Perspectiva era încurajatoare: în ciuda tuturor aşteptărilor, teoria cuantică a spaţiului şi timpului părea mai simplă decât analogul ei clasic. Din păcate, s-a dovedit însă că toate soluţiile găsite de ei descriau spaţii de volum zero (dar cu suprafaţă nenulă), niciunul dintre ele neputând avea legătură cu lumea reală.

Şi totuşi, cu aceste prime rezultate, Rovelli şi Smolin au împins mai departe frontierele gravitaţiei cuantice. Ei au fost călăuziţi mai cu seamă de intuiţie şi de dorinţa de a înţelege conceptele fizice ale teoriei lor. Rovelli şi Smolin reprezentau cele două tipuri de cercetători orientaţi spre fizică. Lee Smolin[39] este fizicianul pursânge: un explorator îndrăzneţ, gata oricând să pătrundă în teritorii necunoscute, asumându-şi riscul de a lansa idei noi care se pot dovedi false. Carlo Rovelli este tipul fizicianului filosof care citează din *Dialogurile* lui Galilei sau din *Principiile* lui Newton şi îşi permite subtilităţi în cercetările de avangardă ale gravitaţiei cuantice. Sceptic în privinţa procedeelor matematice prea înguste, e gata să suspende regulile fizicii cunoscute, în speranţa de a găsi unele noi, mai puternice.

Cercetările lui Rovelli şi Smolin au fost cu putinţă graţie reformulării relativităţii generale înfăptuite de Abhay Ashtekar în 1986. Ashtekar este fizician-matematician, un analist strălucit, şi o personalitate puternică. Mai în vârstă decât Rovelli şi Smolin, a devenit în chip firesc figura de prim-plan a domeniului şi a adunat o echipă de tineri postdoctoranzi ca să efectueze calcule matematice

detaliate.[40] Rezultatul a fost o formă de geometrie asemănătoare cu cea pe care se întemeiază relativitatea generală, dar adaptată spaţiului-timp atomic: un nou tip de matematică făcând legătura între relativitatea generală şi mecanica cuantică. În doar câţiva ani a fost făurit un cadru teoretic surprinzător, care i-a atras pe mulţi cercetători şi studenţi (inclusiv pe mine).

Tinerii fizicieni s-au reorganizat în noi grupuri pentru a duce la bun sfârşit propriile lor proiecte. Deosebit de importantă pentru dezvoltarea domeniului a fost contribuţia lui Thomas Thiemann, fizician matematician, la fel ca Ashtekar, însă unul constructiv, nu analitic. Specialitatea lui nu e analiza detaliată a matematicii existente, ci conceperea unor noi obiecte. În 1993, atunci când au apărut buclele, era încă student la Aachen (student al lui Hans Kastrup, cel care avea să fie conducătorul tezei mele de doctorat). După ce a colaborat cu Ashtekar, a început să lucreze la „reprezentări în spaţii de conexiuni". N-are rost să explic ce înseamnă asta, e de-ajuns să spun că subiectul nu-l poate pasiona decât pe un matematician adevărat.

Thiemann a descoperit astfel câteva identităţi despre care şi-a dat seama în 1996 că puteau fi folosite pentru a aşeza pe o bază mai solidă legile dinamice formulate de Rovelii şi Smolin.[41] Prin această contribuţie, gravitaţia cuantică cu bucle şi-a dobândii caracterul distinct, chiar dacă încă nedesăvârşit.

E interesant de observat că începuturile gravitaţiei cuantice cu bucle au fost marcate de cele patru tipuri de fizicieni teoreticieni: fizicianul preocupat de fenomene, care lansează cele mai îndrăzneţe ipoteze, e mândru că e numit „trăsnit" şi, fatalmente, deseori se înşală; fizicianul filosof, care se concentrează asupra conceptelor, oferind teoriei o baza solidă, dar are tendinţa de a pierde din vedere lucrurile concrete; matematicianul

analist, care poate limpezi legile ce stau la baza unei teorii fizice, însă riscă să reformuleze la nesfârşit rezultate cunoscute; şi matematicianul constructor, care deschide noi căi, dar poate pierde din vedere aspectele fizice. A fost o şansă a gravitaţiei cuantice cu bucle că cele patru tipuri de teoreticieni au participat la primele faze ale dezvoltării ei, dar a fost o neşansă că nu a apărut o personalitate care să le înglobeze pe toate patru, făcând cu putinţă progresul de la ideile iniţiale la rezultate precis formulate. O asemenea personalitate ar fi devenit liderul domeniului, călăuzindu-l de la naştere până la maturitate. Când cele patru tipuri apar la oameni diferiţi, nu calităţile intelectuale dictează cine e liderul, ci versatilitatea sau pur şi simplu vârsta.[42] Nu e de mirare că această situaţie poate influenţa nefast dezvoltarea unui domeniu nou şi unitatea lui. Personalităţi diferite trag în direcţii diferite; verificări bine intenţionate pot trece drept critică ipocrită (sau critica ipocrită se poate ascunde în spatele verificărilor bine intenţionate). E o situaţie dificilă, plină de tensiuni pe care iniţiatorii gravitaţiei cuantice cu bucle n-au ştiut întotdeauna să le dezamorseze.

Mai multe detalii:
Garduri, fibre, filigrane

Un gard trebuie vopsit în două culori separate de o linie orizontală. Pentru aceasta, trebuie să comparăm poziţiile diferitelor stinghii, deplasându-ne pe orizontală de la o stinghie la alta şi luând ca bază solul. Să ne închipuim acum un gard ale cărui stinghii sunt infinit de lungi, fără un capăt care să fie fixat pe o bază. Putem spune ce înseamnă să te deplasezi pe „verticală" – ne mişcăm de-a lungul stinghiilor. Dar cum putem determina direcţia „orizontală" fără să fim orientaţi de o bază în care să ne raportăm?

Într-o asemenea situaţie, avem nevoie de o structură suplimentară, de pildă de un set de săgeţi neverticale, cum sunt indicatoarele rutiere, care să ne spună ce trebuie să înţelegem prin direcţia orizontală. Urmând o asemenea săgeată, ne-am deplasa ni mod neambiguu dintr-un punct al unei stinghii la alt punct ni stinghiei următoare, la fel cum o puteam face raportându-ne în direcţia orizontală convenţională. Doar un asemenea set care defineşte orizontalitatea ne poate spune cum se raportează diferitele stinghii una la alta.

Fizica şi matematica din zilele noastre sunt pline de garduri. N-o spun doar în ideea că cercetătorii nu-i lasă pe concurenţi să intre în domeniul lor, ci şi într-un sens abstract: gardul este un *fascicul de fibre a*le cărui stinghii se numesc fibre, solul este varietatea de bază a fasciculului, iar noi comparăm diferitele fibre cu ajutorul unei co*nexiuni.* Deplasarea de-a lungul direcţiei orizontale, aşa cum e ea determinată de conexiune, se numeşte *transport paralel s*au *olonomie. O* proprietate esenţială a gardurilor generalizate din matematică

este aceea că, deplasându-ne de-a lungul unui gard circular, când revenim la stinghia iniţială nu cădem neapărat în punctul de la care am pornit. (Dacă ne întoarcem mereu în acelaşi punct de pe fibră atunci când ne deplasăm de-a lungul unui cerc în bază, conexiunea se numeşte *plată.)* În funcţie de felul în care conexiunea determină orizontalitatea poate apărea o deplasare, numită *buclă Wilson.*[43]

Relativitatea generală are un gard a cărui bază e constituită din întregul spaţiu-timp, şi ale cărui fibre sunt alcătuite din toate unghiurile de rotaţie posibile (inclusiv schimbările de viteză, din moment ce vorbim despre unghiuri în spaţiu-timp. Schimbarea poziţiei de-a lungul fibrei înseamnă că rămânem în acelaşi punct din spaţiu-timp, dar ne schimbăm orientarea, aşa cum suntem obligaţi s-o facem atunci când ne deplasăm pe o sferă. Conform acestui exemplu, buclele Wilson pe acest gard sunt o măsură a curburii, deci a forţei gravitaţionale. În 1986, Abhay Ashtekar a construit în relativitatea generală un nou gard, împreună cu o conexiune specială, pe baza unei lucrări anterioare a lui Amthaba Sen. În acest caz, baza nu e spaţiul-timp, ci doar spaţiul, iar fibrele reprezintă doar rotaţii spaţiale. Cantitatea de informaţie este prin urmare mai mică, din moment ce timpul este la început neglijat. Se dovedeşte însă că întreaga informaţie privind spaţiile-timp din relativitatea generală poate fi recuperată din buclele Wiâson ale conexiunii Ashtekar împreună cu toate ariile suprafeţelor din spaţiu (sau, mai exact, *fluxurile,* care ne spun şi dacă spaţiul e văzut ca şi cum ar fi reflectat într-o oglindă).

Acestea sunt buclele Wilson folosite de Rovelli şi Smolin în gravitaţia cuantică cu bucle elaborată de ei. În primă instanţă, rezultatele lui Ashtekar s-au limitat la cazul clasic – nu existau fluctuaţii cuantice sau nedeterminare, iar buclele Wilson şi ariile suprafeţelor puteau lua valori arbitrare. Rovelli şi Smolin şi-au dat seama că de fapt

conexiunea lui Ashtekar poate fi descrisă de o funcţie de undă, deci poate fi cuantificată mult mai lesne decât conexiunile folosite tradiţional în relativitatea generală. În acest cadru, conceptele fundamentale ale relativităţii generale şi ale mecanicii cuantice – spaţiul-timp şi funcţia de undă – pot fi combinate direct. O descriere cuantică a interdependenţei dintre spaţiu şi timp necesită acum un fel de „funcţii de undă a mărimilor", în loc de poziţie, ca în mecanica cuantică.

Astfel, nu numai că poziţia şi viteza particulelor materiale se află într-o relaţie de incertitudine, dar în aceeaşi relaţie se află şi dimensiunile geometrice ale scenei pe care se mişcă particula. Nu mai e posibil să măsurăm simultan ariile şi curbura. Pentru a măsura aria unei suprafeţe, trebuie să aliniem rigle gradate de-a lungul marginilor ei şi să comparăm indicaţiile. O comparaţie precisă presupune o rezoluţie bună, ca aceea oferită de un microscop puternic, pentru a ne asigura că, la colţuri, suprafaţa se aliniază într-adevăr cu rigla. La fel ca la măsurătorile de poziţie din mecanica cuantică, microscopul foloseşte semnale care trebuie să interacţioneze cu suprafaţa, făcând ca marginile ei să se deplaseze puţin. Cu cât rezoluţia e mai bună, cu atât mişcarea e mai rapidă. O suprafaţă măsurată pare să aibă rate fluctuante de dilatare sau contracţie, iar dilatarea sau contracţia, la fel ca în cosmologie, sunt legate de curbura – modificarea vitezelor provocată de modificarea poziţiilor – spaţiului-timp înconjurător. Măsurători mai precise ale ariei duc la fluctuaţii mai mari şi la o cunoaştere mai puţin precisă a curburii – iată principiul de incertitudine din gravitaţia cuantică cu bucle. Principii analoge pot fi formulate şi pentru distanţe sau volume, iar acestea din urmă sunt atrăgătoare pentru că implică o matematică mai elegantă.)

Reformularea lui Ashtekar combinată cu cuantificarea lui Ravelli şi Smolin ne duce cu gândul la unificare, dar nu sub forma din teoria corzilor. Este o unificare matematică, şi nu fizică: diversele forţe nu sunt reduse la un principiu unic, ci descrierea lor matematică e uniformă. Forţele suplimentare –electromagnetică, tare şi slabă – se bazează pe conexiuni asemănătoare pe garduri. Fibrele nu sunt orientări sau unghiuri în spaţiul fizic, ca în formularea dată de Ashtekar relativităţii generale, ci unghiuri în spaţii matematice abstracte. Pentru teorii, această diferenţă nu joacă un rol foarte important, aşa încât o mulţime de metode şi idei din electrodinamica cuantică – teoria cuantică a câmpului electromagnetic – pot fi aplicate şi gravitaţiei. Anumite proprietăţi ale relativităţii fac totuşi necesare dezvoltări mai ample ale matematicii pentru ca o teorie cuantica a gravitaţiei să fie elaborată.

Tratarea matematică de la începutul anilor ’90 a oferit reguli de cuantificare pentru ariile şi unghiurile lui Ashtekar, inclusiv relaţii cuantice de incertitudine. Nu se ştia pe atunci dacă puteau exista şi alte forme ale unor asemenea reguli, conducând la alte teorii cuantice. Spre deosebire de cazul teoriei corzilor, problema unicităţii nu era deci lămurită. Alte reguli de cuantificare ar fi condus la predicţii diferite. În principiu, cele corecte puteau fi alese prin comparaţii cu observaţiile, dar nu existau observaţii pentru gravitaţia cuantică. Posibila existenţă a unor cuantificări extrem de diferite punea sub semnul întrebării utilitatea gravitaţiei cuantice cu bucle şi capacitatea ei de a face predicţii.

Mai târziu, prin anul 2002, Hanno Sahimann, pe vremea aceea încă student al lui Thiemann la Institutul Max Planck pentru Fizica Gravitaţiei din Potsdam, a înţeles că, la fel ca în cazul teoriei corzilor, putea fi demonstrată riguros matematic unicitatea regulilor de cuantificare ale gravitaţiei

cu bucle. Formularea detaliată a demonstraţiei a luat ceva mai mult timp, dar, până la urmă, în 2005, demonstraţia a fost publicată de Sahimann împreună cu Jerzy Lewandowski, Andrzej Okolow şi Thiemann, precum şi, independent, de Christian Fleischhack. (Ashtekar a numit în glumă demonstraţia *the LOST result* [rezultatul pierdut], după iniţialele autorilor, dar şi pentru a sublinia timpul scurs până la publicarea ei.)

Rovelli şi Smolin izbutiseră cu mult înainte să determine primele consecinţe spectaculoase ale descoperirii lor. După cum am spus, ei au ajuns repede la concluzia că buclele Wilson reprezintă, într-un mod complet abstract, crearea şi dinamica atomilor de spaţiu. Buclele conduc în chip firesc la o imagine discretă a geometriei spaţiale, aşa cum e de aşteptat pentru teoriile cuantice ale gravitaţiei: distanţele spaţiale, ariile şi volumele sunt generate atunci când buclele construiesc un fel reţea care nu doar susţine spaţiul, ci pur şi simplu îl constituie. Aria unei suprafeţe e determinată de buclele care se intersectează cu ea, după cum se vede în figura 11. Volumul spaţiului depinde de intersecţiile buclelor. Buclele sunt atomi de spaţiu, conferind spaţiului o geometrie – lungimi, arii şi volume. Imaginea aceasta e cu totul diferită de cea din relativitatea generală: substanţa spaţiului nu e ca un cauciuc, ci ca o pânză ţesută din fire. (Încă înainte de apariţia gravitaţiei cuantice cu bucle, John Wheeler s-a gândit la o structură fină a spaţiului-timp, pe care a botezat-o „spumă spaţio-temporală”.)

Putem privi spaţiul gravitaţiei cuantice cu bucle ca pe un fel de structură ţesută, dar aceasta e o vizualizare a obiectelor matematice, iar nu ceva tangibil: dacă nu sunt bucle, nu e nimic. Buclele trebuie să construiască spaţiul în care lumina să se poată propaga pentru a pune în evidenţă structura spaţială. O buclă singură nu poate fi văzută nici măcar cu cel mai puternic microscop, fiindcă

niciun semnal nu poate călători prin golul care o înconjoară. Putem cel mult căpăta indicii indirecte în privinţa ei pe baza a ceea ce se întâmplă la scară mare, după cum vom vedea mai târziu.

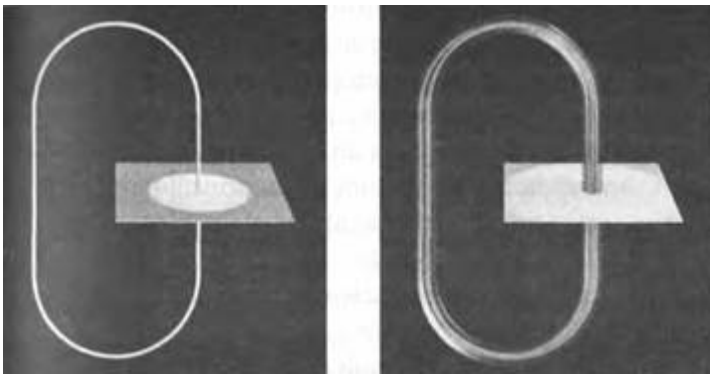


Figura 11. *O buclă generează arie atunci când intersectează o suprafaţă (stânga). Atunci când se suprapun mai multe bucle, aria indusă creşte proporţional (dreapta)*

Un spaţiu vast, cum e universul din prezent, trebuie să conţină numeroase bucle, din moment ce fiecare dintre ele contribuie la volum doar cu o valoare minusculă. Buclele se pot, de asemenea, intersecta sau suprapune parţial, însă chiar şi acelea care nu se intersectează şi nu se suprapun sunt înnodate într-o ţesătură ascunsă, ca în figura 12. Privită de la distanţă, aceasta ţesătură poate părea un spaţiu continuu, aşa cum se presupune în relativitatea generală.

Pentru a vedea cum apar aceste spaţii discrete într-un proces dinamic de transformare, nu prin adăugarea sau îndepărtarea buclelor cu mâna, ci lăsându-le să interacţioneze pentru a produce unele noi sau a se autodistruge, trebuie să folosim ecuaţiile atomice de evoluţie. Aceste ecuaţii şi soluţiile lor trebuie să explice, înainte de toate, cum se face că proprietăţile discrete ale spaţiului, la nivel elementar, dau naştere, la scară mare, acelei structuri clasice netede, ca un cauciuc, pe care o observăm. Cum „apare” această structură atotcuprinzătoare pe care o numim spaţiu-timp din interacţiile cuantelor elementare? Prin contribuţiile

lui Rovelli, Smolin, Ashtekar şi ale colaboratorilor lor, gravitaţia cuantică cu bucle era îndreptăţită să încerce să răspundă la asemenea întrebări.

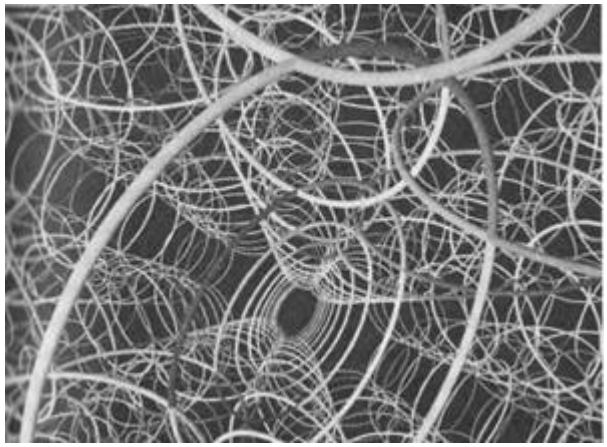


Figura 12. Imagine a ţesăturii care determină excitaţiile geometric-cuantice ale spaţiului-timp prin „ochiurile" ei. Cu cât e mai densă, cu atât mai continuu ne apare spaţiul. Nuanţele de gri indică nivele de excitaţie ale buclelor.

Se credea că nu va dura mult până să fie deduse legile evoluţiei în timp a unui univers guvernat de gravitaţia cuantică. Forţa electromagnetică în forma ei cuantică, cu fotonii în chip de cărămizi elementare, a fost înţeleasă în esenţă încă din anii ’30. Pentru celelalte forţe fundamentale, cu excepţia gravitaţiei, s-a găsit o descriere matematică coerentă la scurt timp după ce au fost descoperite în interacţiile dintre particule. Gravitaţia era cunoscută de secole, şi ar fi trebuit să fie şi ea tratată cuantic. Mari fizicieni precum Paul Dirac şi Richard Feynman n-au reuşit s-o facă. Nici John Wheeler şi Bryce DeWitt, în anii ’60, sau Stephen Hawking, în anii ’80, n-au avut sorţi de izbândă. Ceea ce lipsea în toate aceste încercări era o înţelegere a naturii fundamentale a spaţiului-timp până la scara lui atomică – iar gravitaţia cuantică cu bucle tocmai asta a oferit.

Formularea, pe mijlocul anilor ’90, a unor ecuaţii într-o formă matematică utilă, în gravitaţia cuantică cu bucle, a reprezentat un progres

important. Când Thiemann şi-a prezentat ecuaţiile, fizicienii erau extrem de optimişti, aproape euforici. În principiu, aceste ecuaţii puteau fi folosite pentru a determina structura spaţiului-timp în cele mai fine detalii. Analizând trecutul unui spaţiu-timp atomic, pornind de la orice aranjament al buclelor, se putea merge cu calculele înapoi în timp pentru a găsi de unde provenea acel spaţiu-timp. Puteam încerca să înţelegem universul în primele lui momente, eventual într-o stare fără bucle, aşa cum va fi fost pesemne la singularitatea big bang. Sau ecuaţiile gravitaţiei cuantice cu bucle ar putea pune în evidenţă abateri de la cele ale relativităţii generale la aceste imense densităţi de energie din universul timpuriu, care ar face să nu mai fie vorba de o stare de volum zero, aşa încât singularitatea ar dispărea. Dacă am stăpâni suficient de bine ecuaţiile, am putea răspunde probabil la toate întrebările tulburătoare pe care ni le punem. La scurt timp după isprava lui Thiemann, Lewandowski a organizat o conferinţă la Institutul Banach din Varşovia, la care se spune că opinia predominantă era că am putea rezolva acum toate problemele fundamentale ale cosmosului, odată ce legile care îl guvernează ar fi cunoscute. (Eu nu pot depune mărturie în privinţa asta, la vremea aceea eram student, şi nu am participat la conferinţă.) Din păcate însă, complexitatea ecuaţiilor a făcut să se prăbuşească rapid toate speranţele, iar până în prezent n-a fost găsită nici o singură soluţie exactă, şi nici măcar una aproximativă, care să descrie un întreg univers.

Aceste dificultăţi nu sunt surprinzătoare dacă ţinem cont de anvergura misiunii. Să formulezi, iar apoi să rezolvi ecuaţiile atomice pentru transformările dinamice ale buclelor din gravitaţia cuantică este un proces extrem de complicat, atât în plan matematic, cât şi în plan conceptual. El ilustrează, între altele, rolul special şi derutant al

timpului în crearea unui model fundamental. Nu există un spaţiu-timp de la care să pornim; chiar şi în teoria clasică a relativităţii generale, spaţiul-timp şi structura lui rezultă în urma rezolvării ecuaţiei lui Einstein. În gravitaţia cuantică, sarcina este de a găsi ecuaţia analogă, ţinând cont de cele mai mici detalii atomice. Ceea ce în mod clasic înţelegem prin spaţiu şi timp apare aici ca o versiune colapsată a unui număr infinit de spaţii cu diferite dimensiuni şi geometrii, luate aflate într-o superpoziţie cuantică. Conform teoriei cuantice, toate acestea există „simultan", fără ca timpul să fi apărut încă. Putem privi această superpoziţie ca o disecţie a spaţiului-timp, ca un pachet de cărţi de joc, în configuraţiile lui spaţiale la momente de timp fixate, dar neordonate deocamdată, din cauza absenţei timpului.

Odată obţinută o asemenea soluţie matematică, ea poate fi analizată în continuare. În această etapă, toate configuraţiile spaţiale pot fi ordonate, de pildă aranjându-le după volumele lor. Apoi intră în acţiune evoluţia, permiţând calcularea altor cantităţi pentru configuraţiile ordonate, cum e densitatea de materie. Putem, de exemplu, deduce o relaţie între densitate şi volumul spaţiului, asemănătoare cu soluţiile obţinute pentru ecuaţiile lui Einstein în context cosmologic. În acest caz însă, etapele intermediare ale transformărilor atomice şi ale superpoziţiei cuantice au adus cu sine aspecte esenţiale ale gravitaţiei cuantice, în special legat de ceea ce se întâmplă în regiunile de mare densitate. Conceptele de evoluţie şi de timp au apărut într-o a doua etapă, ele nefiind prezente în soluţiile iniţiale.

E dificil nu numai să rezolvi ecuaţiile, dar chiar şi să le formulezi. Pentru consistenţă, rezultatele obţinute din soluţii trebuie să nu depindă de timpul ales pentru ordonare. La aranjarea configuraţiilor spaţiale ale unui univers în expansiune pare firesc să folosim volumul spaţiului, dar aceasta nu e

unica posibilitate. Am putea folosi temperatura sau orice alt parametru fizic suficient de bine direcţionat. Dacă ceea ce deducem ar depinde semnificativ de cantitatea aleasă pentru a ordona evenimentele, n-am putea face predicţii. Aceasta conduce la un principiu important, cunoscut în relativitatea generală sub numele de *covarianţă*, care trebuie respectat şi de ecuaţiile atomice ale gravitaţiei cuantice. Deşi deocamdată nu s-a ajuns la o formulare pe deplin covarianţă a gravitaţiei cuantice cu bucle, lucrările lui Thiemann au oferit câteva indicii privind felul în care trebuie procedat.

O altă dificultate, în afară de cea legată de consistenţă, ţine de faptul că ecuaţiile nu sunt unic precizate; forma lor finală nu e încă limpede. Sunt cunoscute câteva proprietăţi generale ale lor, pe baza regulilor unice de cuantificare pentru arii şi curbură, care deosebesc acest tip de ecuaţii de altele din fizica gravitaţiei, însă unii termeni din ecuaţiile dinamice depind de parametri nedeterminaţi. Spre deosebire de cazul teoriei corzilor, nu se poate spune deocamdată că avem de-a face cu o dinamică unică, deşi regulile de cuantificare sunt unice. Nu ştim să alegem paşii discreţi cu care variază volumul; universul în expansiune poate creşte în mai multe feluri. Totuşi, gravitaţia cuantică cu bucle are un avantaj important: ea ne poate dezvălui unele proprietăţi ale universului la big bang, poate că nu prin soluţii exacte, dar măcar prin aproximaţii sau prin modele. Construcţia iniţială a lui Thiemann, deşi deseori modificată între timp[44], joacă un rol decisiv în aplicaţiile teoriei.

Universul discret:
Ţeserea istoriei lumii

Buclele ţes spaţiul într-o textură densă. Chiar şi spaţiul gol e umplut de ele – într-un metru cub, numărul lor s-ar scrie cu o sută de cifre. Această textură se modifică în permanenţă, căci transformarea buclelor este cea care codifică timpul. Mai mult, e o textură difuză, supusă fluctuaţiilor cuantice. La nivel fundamental, spaţiul e extrem de agitat. L-am putea vizualiza ca pe o masă de aer încins care trepidează deasupra unei autostrăzi într-o zi caniculară.

Spaţiul e în mod curent perceput ca o scenă pe care se deplasează materia sau se propagă semnalele. Toate acestea se petrec într-o ţesătură de bucle, însă nimic nu sare de la o buclă la alta (pentru că nu e nimic între bucle). În schimb, pe măsură ce buclele aflate în permanentă trepidaţie îşi schimbă felul în care sunt conectate, ele transportă materie sau semnale, deplasând la fiecare pas câte un atom spaţial. În felul acesta, materia poate difuza prin ţesătura de bucle şi se poate deplasa. Când mişcăm braţul, toţi atomii lui, ba chiar şi particulele elementare, trebuie să se mişte împreună. În mod asemănător, când o particulă elementară se deplasează, toţi atomii ei spaţiali se scurg împreună. Deşi efectuarea mişcărilor ni se pare banală, descrierea lor detaliată e o sarcină extraordinar de complexă.

În cosmologie, scena pe care se petrec transformările este întreg universul, al cărui volum e supus, în gravitaţia cuantică cu bucle, aceleiaşi nedeterminări cuantice ca şi materia. În medie, el se extinde uniform, dar, dacă am putea privi expansiunea la scară mică, am observa infime

variaţii. În plus, au loc salturi cuantice la fel cum se întâmplă cu valorile energiilor atomilor şi moleculelor. Dimensiunea universului nu se schimbă continuu, ci în salturi mici – creşte cărămidă cu cărămidă. Cărămizile sunt extrem de mici, de ordinul lungimii Planck, de aceea creşterea pare continuă.

Întreg spaţiul apare adăugând buclă după buclă. În acest proces trebuie să pornim de la o stare iniţială, sau suntem conduşi la ea inversând jocul şi scoţând buclă după buclă. La urmă rămânem cu un obiect fără nicio buclă – „starea infernală", pomenită mai sus. Vedem deci pentru prima dată că gravitaţia cuantică cu bucle ne poate da informaţii despre big bang, căci şi în relativitatea generală singularitatea big bang e o stare de volum nul (dar cu o densitate de energie a materiei infinită). Pentru a înţelege ce se petrece atunci, nu-i de ajuns să înlăturăm cu mâna câte o buclă, ci trebuie să analizăm felul în care dinamica spaţiului-timp cuantificat poate face acest lucru. Aşa cum relativitatea generală descrie expansiunea universului printr-un spaţiu-timp care satisface ecuaţiile lui Einstein, cum sunt ecuaţiile diferenţiale ilustrate în figura 4, gravitaţia cuantică cu bucle are ecuaţii de natură discretă care descriu dinamica apariţiei şi dispariţiei buclelor. Pornind de la o configuraţie iniţială şi funcţia ci de undă cuantică, poate fi determinată evoluţia ulterioară în timp, ea o consecinţă a adăugării şi înlăturării buclelor.

Imaginea unui univers agitat, structurat la scara cea mai mică de o ţesătură discretă, iar nu de un spaţiu-timp neted, înlocuieşte imaginea unei foi de cauciuc, folosită în relativitatea generală. Cele mai mici schimbări de volum sunt exprimate în funcţie de lungimea Planck, fiind deci într-adevăr minuscule. Un singur salt cuantic e imperceptibil la scara universului pe care îl observăm acum. Însă, la dimensiuni mici, ca acelea ale universului

timpuriu, structura întreţesută e extrem de importantă. Atunci, universul însuşi e atât de mic, încât o modificare continuă a volumului diferă mult de un salt cuantic. În acele momente, expansiunea universului e cu totul diferită de ceea ce ne-am aştepta conform relativităţii generale; este nevoie de corecţii cuantice la ecuaţiile lui Einstein.

Problema singularităţii apare ca o consecinţă a imaginii continue, or, în această privinţă, gravitaţia cuantică se abate mult de la teoria clasică. Ar putea fi astfel rezolvată problema singularităţii? Poate gravitaţia cuantică cu bucle să salveze universul de singularitate, la fel cum mecanica cuantică stabilizează atomul de hidrogen şi ceilalţi atomi?

Cosmologia cuantică cu bucle:
Netezirea atomilor

Aplicarea gravitaţiei cuantice cu bucle la problema singularităţii, aşa cum se iveşte ea de pildă în cosmologie, pare dificilă la prima vedere. La urma urmelor, dinamica buclelor este atât de complicată, încât n-a fost găsită încă nici o singură soluţie exactă, şi nimeni nu se aşteaptă ca lucrurile să se schimbe în viitorul apropiat. De asemenea, analiza ecuaţiilor fără cunoaşterea unor soluţii explicite ar avea de înfruntat mari dificultăţi. Numai că asta nu se întâmplă doar în gravitaţia cuantică. Nici ecuaţiile lui Einstein din relativitatea generală nu sunt uşor de rezolvat, şi totuşi cunoaştem câteva dintre proprietăţile lor generale. Cel mai important exemplu este problema singularităţii, conform căreia toate soluţiile, nu doar cele puţine, cunoscute explicit, trebuie, în anumite condiţii realiste – privind, de pildă, forma materiei să ajungă la o singularitate sau să fi provenit dintr-una.

Într-o teorie complicată cum e relativitatea generală, soluţii exacte pot fi găsite doar în cazuri particulare, prezentând adeseori un grad înalt de simetrie. În cosmologie se porneşte de regulă de la premisa omogenităţii şi izotropiei: dincolo de detalii cum sunt planetele, stelele sau chiar întregi galaxii, la scară foarte mare, cosmosul nu prezintă proprietăţi care să depindă de poziţie. Tribulaţiile planetelor sau ale galaxiilor nu joacă niciun rol în ansamblul universului. Cartografierea universului la scară mare în programul Sloan Digital Sky Survey (SDSS) vine în sprijinul „principiului cosmologic” susţinut de multă vreme. De asemenea, la scară mare, universul apare uniform

independent de direcţia în care privim. Prin urmare, expansiunea globală a universului poate fi descrisă prin soluţii simplificate, în care ţinem cont doar de modificarea în timp a volumului lui.

Ignorând numeroase detalii, ecuaţiile sunt enorm simplificate în locul mai multor funcţii care depind puternic una de alta, e suficient să considerăm o singură funcţie. În asemenea cazuri, cunoaştem destule soluţii, pe care le folosim pentru a evalua observaţiile cosmologice. Chiar dacă ne limităm la soluţii simetrice, nu pierdem din vedere aspectele conceptuale care ne interesează aici: cu această simplificare, problema singularităţii tot apare. Volumul unui univers omogen şi izotrop devine la un moment dat nul, iar teoria se prăbuşeşte.

Gravitaţia cuantică cu bucle este încă mai complicată decât relativitatea generală, aşa că nu e de aşteptat să putem renunţa la ipoteze simplificatoare. Dacă am descrie măcar cele mai simetrice exemple din gravitaţia cuantică, studiul problemei singularităţii ar fi posibil, dar cum putem face această simplificare? E limpede cum poate fi impusă simetria spaţiului-timp neted, ca o foaie de cauciuc, din relativitatea generală. Ce ne facem însă cu buclele din gravitaţia cuantică? O ţesătură simetrică, aşa cum se vede în figura 13, ar fi mai ordonată decât cea din figura 12, numai că nici măcar această reţea regulată nu e omogenă: legăturile din ea se deosebesc de nimicul în care e scufundată. Ne-am putea teme că, impunând cerinţele simetriei, n-ar mai rămâne nimic din proprietăţile cuantic-gravitaţionale ale reţelei, între care salturile cuantice ale volumului, care dezvăluie efecte esenţiale într-un univers minuscul.

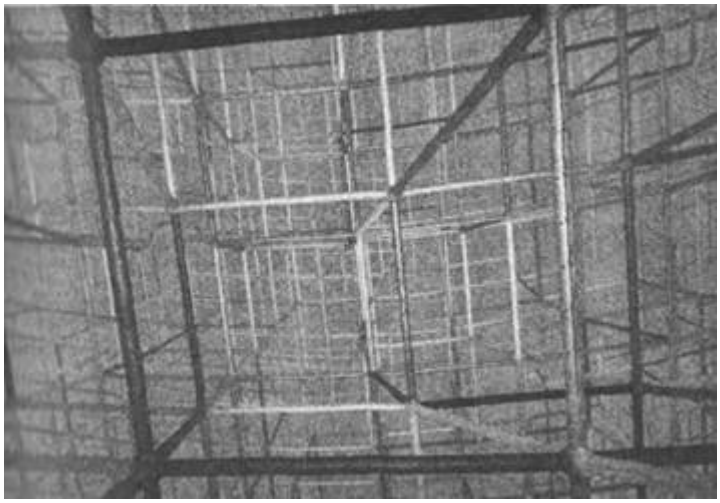


Figura 13. *O reţea spaţio-temporală regulată.*

Din fericire, şi surprinzător pesemne, se dovedeşte că proprietăţile cele mai importante se păstrează şi dacă sunt impuse omogenitatea şi izotropia spaţiului. O asemenea situaţie simetrică nu permite existenţa buclelor individuale într-un spaţiu devenit uniform, dar modificarea în timp, în special a volumului, are loc în salturi mici. Mai mult, există o „stare infernală" fără bucle în care volumul se anulează, cam la fel ca în cazul singularităţii big bang. În anul 2000 şi în anii următori, metodele matematice elaborate în deceniul anterior au permis nu numai formularea unor geometrii izotrope în noua cosmologie cuantică cu bucle, dar şi analiza evoluţiei lor temporale, aşa cum fusese definită de Thiemann.

Părea deci cu putinţă cercetarea teoretică exhaustivă a problemei singularităţii, însă o aplicaţie concretă tot nu se ivea, căci până şi ecuaţiile cu cea mai înaltă simetrie posibilă erau prea complicate. Descoperirea a apărut atunci oarecum graţie şansei, după cum ştiu din experienţa mea directă, într-un exemplu care arată felul în care influenţele externe pot acţiona asupra dezvoltării ştiinţei. Progresul nu e atât de logic pe cât ne închipuim.

După ce am impus primul set de presupuneri simetrice pentru a simplifica ecuaţiile, ele rămâneau inutilizabile pentru analiza evoluţiei în cosmologia cuantică. Apărea o nouă posibilitate de simplificare, dar mi-am spus că nu e validă, fiindcă ecuaţiile fără aplicaţii concrete nu prezentau mare interes. Realizarea omogenităţii şi izotropiei, în ciuda unei forme deloc simetrice a buclelor, putea fi o temă interesantă matematic, însă nu dezvăluia noi fenomene fizice. Mă confruntam şi cu altă dificultate: încă din anii ’60 exista o cosmologie cuantică, creată de John Wheeler şi Brice DeWitt, în urma încercărilor lor de a cuantifica gravitaţia, şi dezvoltată de fizicieni precum Charles Misner, Alex Vilenkin, Jim Hartle şi mai cu seamă Stephen Hawking. Claus Kiefer contribuise şi el cu o serie de studii amănunţite la înţelegerea comportamentului semiclasic, o temă importantă acum pentru explicarea structurii care apare în universul timpuriu.

Toate acestea se petrecuseră înainte ca Ashtekar să reformuleze relativitatea generală şi ca Rovelli şi Smolin să introducă gravitaţia cuantică cu bucle, deci acest tip de cosmologie cuantică nu se baza pe un spaţiu discret. În această teorie nu se ştia cum arată spaţiul la scară mică, ea funcţiona doar pentru spaţiile omogene ale cosmologiei. La sfârşitul secolului XX, în rândul fizicienilor prevala ideea că vechea cosmologie cuantică şi gravitaţia cuantică cu bucle sunt două feţe ale aceleiaşi teorii: pentru soluţii fără vreo simetrie, aveam gravitaţia cuantică cu bucle, cu complicata ei construcţie a spaţiului din cărămizi elementare discrete; dar atunci când spaţiului i s-ar impune simetria, permiţând să fie privit doar la scări mult mai mari decât atomii spaţiali, am avea de-a face cu vechea cosmologie cuantică. Analiza ecuaţiilor simetrizate din gravitaţia cuantică cu bucle ar fi fost inutilă, fiindcă n-ar fi putut să aducă ceva nou, şi, într-adevăr, mari personalităţi din domeniu mi-

au spus în repetate rânduri că îmi pierd timpul cu simetrizarea.

În contextul problemei singularităţii, reproducerea directă a vechii cosmologii cuantice ca un caz particular simetric al gravitaţiei cuantice cu bucle ar fi avut efecte dezastruoase. Dacă descrierea spaţiilor-timp cosmologice ar fi fost în chip inevitabil vechea teorie, singularităţile n-ar fi putut fi înlăturate, iar problema ar fi rămas nerezolvată. Ca posibilă teorie cuantică a universului, cosmologia cuantică elaborată de Wheeler şi DeWitt conduce la o funcţie de undă şi la relaţii de nedeterminare, dar pachetele ei de unde dispar într-o singularitate comparabilă cu cea clasică. Există în continuare un moment la care – ignorând inevitabila incertitudine – volumul universului se anulează, iar temperatura diverge. La fel ca ecuaţiile lui Einstein, ecuaţiile cosmologiei cuantice îşi pierd valabilitatea matematică, lăsând învăluit în mister ce se întâmplă la big bang.

Implicaţia acestui eşec e simplă: versiunea iniţială a cosmologiei cuantice introduce câteva efecte cuantice, dar ezită înaintea pasului decisiv. Ea ignoră natura discretă a spaţiului şi timpului, după cum avea să se vadă mai târziu în gravitaţia cuantică cu bucle. În apropierea singularităţii, comportamentul se schimbă puţin faţă de cel din relativitatea generală, dar nu în mod esenţial. Abia cosmologia cuantică cu bucle a putut să pună în evidenţă acest fapt şi să ofere un mecanism fizic concret pentru evitarea singularităţilor.

Pentru a lămuri toate acestea, ar fi trebuit rezolvate întâi ecuaţiile cosmologiei cuantice cu bucle – sarcină extrem de dificilă, care însă, graţie şansei, a devenit posibilă. După ce am construit formularea simetrică a gravitaţiei cuantice cu bucle, sau cosmologia cuantică cu bucle, pentru teza mea de doctorat sub îndrumarea lui Hans Kastrup la Universitatea din Aachen, am uitat o

vreme de ecuaţiile ei. În 2000, m-am mutat la Universitatea de Stat din Pennsylvania, unde Ashtekar îmi oferise nu angajament postdoctoral. (A făcut-o în ciuda faptului că, pe atunci, nu credea în perspectivele cosmologiei cuantice cu bucle. După o îndelungată muncă de convingere din partea mea[45], a adoptat-o în cercetările sale şi a adus câteva contribuţii însemnate în domeniu.)

După ce m-am mutat, m-am întors la munca mea, dar nu mai eram familiarizat cu toate detaliile. Uitasem motivul pentru care simplificarea crucială nu era valabilă. Totul s-a întâmplat în timpul unui sfârşit de vară fierbinte şi umed, tipic pentru estul Statelor Unite, cu care nu fusesem obişnuit. Ţin încă minte canicula din timpul zilei şi cântecul greierilor din timpul nopţii, precum şi scăderea concentrării, combinată cu un nivel mai scăzut de inhibiţie, care mă făcea să acord mai puţină atenţie temerilor de ordin matematic. Am efectuat simplificarea, am rezolvat câteva ecuaţii şi am văzut universul buclelor dinainte de big bang.

Era însă permis acest lucru? Perspectiva calculului, o posibilă rezolvare a problemei singularităţii, era prea tentantă ca să renunţ din nou. După momentul de entuziasm de la începui, mi-am adus aminte că nu efectuasem simplificarea din pricina aparentei inconsistenţe la care aş fi ajuns. Aruncând o privire nouă asupra vechii probleme, am demonstrat că simplificarea crucială era nu numai permisă matematic, dar chiar necesară pentru aplicarea completă a simetriei. Prima mea versiune, fără pasul decisiv, ar fi lăsat spaţiul uşor deformat. Odată înlăturat acest ultim element de asimetrie, ecuaţiile puteau fi tratate cu metodele standard pentru a obţine soluţii explicite şi a deduce proprietăţi generale.

Astfel, primele rezultate ale cosmologiei cuantice cu bucle, dezvoltate în anii următori pentru a conduce la scenarii ale universului care

vor fi prezentate în continuare, au fost puse pe o bază solidă. Acum puteau fi abordate chiar şi spaţiile-timp care nu se supun strict principiului cosmologic, iar numeroşi cercetători au început să lucreze în această direcţie. Dincolo de consecinţele imediate legate de iniţierea cosmologiei cuantice cu bucle, această experienţă arată cât de puternic pot influenţa opiniile adânc înrădăcinate activitatea de cercetare, uneori chiar blocând-o, şi că se întâmplă ca progresul să apară atunci când păşeşti pe de lături.

Mai puţin înseamnă mai mult:
Cum să câştigi timp

Nimic nu e mai preţios decât timpul, căci el este preţul eternităţii.

Louis Bourdaloue

Universul seamănă cu un alergător de cursă lungă, cel mai rezistent din câţi se pot închipui. Aşa cum ştie orice alergător, se întâmplă să-ţi atingi limitele fizice – muşchii slăbesc, mişcarea e necontrolată. Deşi o cursă în care îţi foloseşti la maximum resursele pare un proces care se desfăşoară lin, pentru a trece cu bine peste perioadele de slăbiciune, trebuie să-ţi calculezi cu atenţie fiecare pas; paşi prea mari consumă prea multă energie, paşi prea mici slăbesc tensiunea musculară şi te fac să te poticneşti.

În momentul de faţă universul dispune de o putere imensă, ba pare chiar să fi început de câtva timp un sprint – o acceleraţie a expansiunii sale despre care vom vorbi în capitolul următor. (Ai zice că izbucnirea a fost declanşată de spectatori: după cum ne indică vitezele cu care se îndepărtează stelele de la mare distanţă care explodează, în raport cu scara de timp cosmologică, acceleraţia a început relativ recent, nu cu mult înainte ca omenirea să facă primele observaţii asupra cosmosului.)

Big bang-ul, dimpotrivă, pare o perioadă de slăbiciune. Universul s-a încălzit şi a fost pe punctul să se distrugă, moment critic reflectat în descrierile teoretice actuale. Relativitatea generală presupune o cursă continuă, dar ajunge la o singularitate, în timp ce teoriile cuantice ale

gravitaţiei acordă mai multă atenţie fiecărui pas. Este oare de ajuns pentru a supravieţui big bang-ului?

Cosmologia cuantică cu bucle a reuşit acest lucru. În primul rând, prin procesul interactiv de modificare a buclelor spaţiale, a introdus un timp discret, îmbunătăţind astfel vechea versiune a cosmologiei cuantice. Timpul nu se poate schimba arbitrar, ci doar în multipli ai celui mai mic pas temporal: schimbarea are loc atunci când buclele întreţesute se reconectează, dar nu în intervalele dintre aceste ochiuri de ţesătură discrete. Cosmologia cuantică cu bucle acordă universului mai puţin timp, odată ce toate momentele care cad între cei mai mici paşi ai timpului sunt eliminate. Acest lucru se întâmplă la scară microscopică şi, din cauza valorii foarte mici a pasului – de dimensiune Planck, e imperceptibil pentru noi. Mai interesant e însă faptul că acest *mai puţin* timp, la nivel microscopic, se însoţeşte cu *mai mult* timp, la nivel macroscopic. Linia timpului la scării întregului univers e extinsă; timpul nu se sfârşeşte la big bang.

Există o preistorie a universului înainte de big bang, cu un spaţiu şi un timp aşa cum nu se pot vedea în relativitatea generală. La fel cum, combinând relativitatea specială cu teoria cuantică, Dirac a dezvăluit noua lume a antimateriei, combinarea relativităţii generale cu mecanica cuantică ne conduce spre o nouă lume a spaţiului şi timpului. Acest univers dinainte de big bang este acoperit de un văl care nu poate fi străpuns de ecuaţiile relativităţii generale, ci doar de cele ale cosmologici cuantice cu bucle. Înainte de big bang, universul s-a contractat; el s-a prăbuşit până la dimensiuni tot mai mici sub acţiunea propriei sale greutăţi, ajungând în cele din urmă în faza fierbinte şi densă a big bang-ului. Această tranziţie poate fi analizată nu mai cu ajutorul teoriilor cuantice ale gravitaţiei. Limitele teoriei clasice

sunt depăşite printr-o teorie mai cuprinzătoare, care ţine cont de proprietăţile cuantice. Singularitatea big bang se dovedeşte a fi o limită a limbajului în care a fost iniţial formulată, dar nu o limită a lumii.

Cum e posibil aşa ceva? Cum poate fizica cuantică împiedica prăbuşirea universului până la un punct şi creşterea nemărginită a temperaturii? Cum se poate căi gravitaţia, după ce, nesăbuită, îi provocat prăbuşirea propriei sale întrupări, spaţiul-timp? La fel ca în problema stabilităţii atomilor, rezolvată de mecanica cuantică, în cosmologia cuantică cu bucle singularitatea big bang e evitată prin prezenţa unor noi forţe repulsive, care acţionează împotriva prăbuşirii provocate de gravitaţia clasică pur atractivă. Prăbuşirea unui univers ce se contractă, atunci când ajunge suficient de mic pentru ca efectele teoriei cuantice să devină importante, este la început încetinită, apoi oprită, pentru ca în cele din urmă, să se transforme în expansiune. În linii mari, ne putem închipui o parte a istoriei universului nostru astfel: înainte de big bang s-a contractat inversul expansiunii observate în prezent. Colapsând, a devenit tot mai mic şi mai fierbinte, şi a intrat în faza big bang. În acel moment, efectele cuantice au început să predomine, procesul a fost încetinit, iar apoi inversat, pentru a se ajunge la expansiunea vizibilă în universul de azi.

Detaliile acestei istorii, de pildă proprietăţile exacte ale universului înainte de big bang, sunt mult mai greu de cunoscut. Semăna oare acest univers cu al nostru, cu diferenţa că se prăbuşea în loc să se dilate? Inversul expansiunii avea oare şi alte consecinţe, cum ar fi răsturnarea percepţiei asupra timpului, aşa încât să ţii minte viitorul şi să prezici trecutul? Structura sa spaţio-temporală, cu mult înainte de big bang, când va fi avut un volum mare, era oare atât de clasică, încât să fie comparabilă cu forma spaţiului-timp din prezent?

Sau efectele cuantice erau predominante chiar şi în privinţa spaţiului şi timpului, aşa încât volumul, deşi în medie se contracta, era supus unor violente fluctuaţii şi salturi cuantice? Existau oare condiţii care să permită apariţia vieţii? De unde a apărut acest univers în contracţie şi încotro se îndreaptă universul nostru în expansiune? Dilatarea din prezent se va transforma oare într-o bună zi în contracţie astfel încât, la fel ca universul precedent al nostru să se îndrepte spre un big bang, din care să se nască o nouă lume? A provenit oare universul dinainte de big bang din prăbuşirea unuia şi mai vechi, care, la rândul lui, s-a născut dintr-un big bang? Există oare o succesiune infinită de asemenea big bang-uri, între care sunt faze de expansiune şi prăbuşire?

Pentru a răspunde la asemenea întrebări ar trebui să pătrundem mult mai adânc în teorie. Cele mai multe dintre ele nu pot căpăta deocamdată un răspuns, iar unele pesemne că nu vor putea fi niciodată abordate prin teorii fizice – ele ţin mai curând de filosofie. În această carte vom vorbi în continuare despre ceea ce se cunoaşte până acum.

Evitarea singularităţii:
Ricoşeul întregului univers

În limbajul matematic al gravitaţiei cuantice cu bucle, un univers care colapsează ca rezultat al atracţiei gravitaţionale, o lume care se contractă până la dispariţia atomilor spaţiali, se apropii de starea infernală, domeniul inexistenţei absolute a spaţiului. Istoria universului devine complet haotică. Spaţiul fluctuează şi se dezintegrează, toate forţele se luptă pentru dominaţie, dând lovituri nimicitoare nu doar materiei, ci şi spaţiului şi timpului. În această bătălie cumplită, o forţă devine predominantă: gravitaţia. Dacă în condiţii normale e pusă în inferioritate de celelalte forţe fundamentale, acum ea deţine supremaţia. Se opune avalanşei stârnită de ea însăşi, opreşte contractarea, iar apoi lasă universul să-şi dea frâu liber extinzându-se.

Cum poate, în mod concret, gravitaţia cuantică da naştere unor forţe care să contrabalanseze propria ei atracţie clasică? Din punct de vedere matematic, dar şi intuitiv, aceasta e o consecinţă a faptului că timpul e discret; ansamblul punctelor lui nu e o dreaptă continuă, ci o mulţime discretă, ca o grilă, care nu poate stoca decât o cantitate finită de energie. Asemenea unui burete care nu poate absorbi decât o cantitate limitată de apă – când e complet îmbibat, respinge surplusul de apă –, grila timpului acţionează repulsiv atunci când prea multă energie ameninţă să fie prezentă ia un moment dat.

Natura cuantică a materiei joacă aici un rol important, iar descrierea ei trebuie făcută prin funcţii de undă. Energia e dată de frecvenţa funcţiei de undă, adică de numărul de oscilaţii pe

unitatea de timp. La fel ca în cazul luminii, cu cât frecvenţa e mai înaltă, cu atât unda are mai multă energie. O frecvenţă înaltă înseamnă o distanţă mică între oscilaţii: între două oscilaţii succesive ale undei, intervalul de timp e scurt. O linie a timpului continuă permite oscilaţii foarte scurte, deci o cantitate de energie oricât de mare. O grilă a timpului nu permite însă decât oscilaţii a căror lungime e mai mare decât distanţa dintre două puncte învecinate. O asemenea undă ar fi discretă şi deformată, putând fi totuşi recunoscută ca atare, dar undele mai scurte ar dispărea pur şi simplu, fiindcă oscilaţiile lor ar cădea între punctele de pe grilă. Astfel, timpul discret elimină oscilaţiile prea rapide şi energiile prea mari (figura 14).

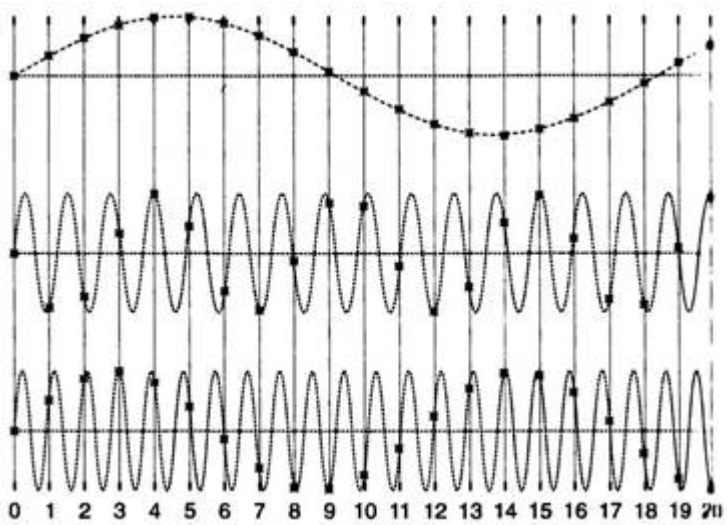


Figura 14. Dacă *eşantionăm unde luând valorile lor doar în nodurile unei grile cu intervale fixe (ca rezultat al naturii atomice a spaţiului) lungimile de undă scurte sunt eliminate. Unda de sus, a cărei lungimi de undă e mai mare decât intervalul, nu e prea mult distorsionată prin eşantionare; comportamentul ei neted rămâne recognoscibil prin mulţimea valorilor discrete pe care le ia în punctele grilei. Când lungimea de undă se apropie de valoarea intervalului sau e mai mică decât ea, eşantionarea dă o imagine foarte diferită de cea a undei (cele două unde de jos). Oscilaţiile în punctele unde se face eşantionarea prezintă o lungime de undă care e întotdeauna mai mare decât intervalul grile.*

Dimensiunea mică a paşilor face ca grila să poată absorbi o mare cantitate de energie, dar nu una infinită. Deşi în majoritatea situaţiilor limitarea energiei nu joacă vreun rol, ea se dovedeşte importantă la big bang, evenimentul cel mai energetic din univers. Conform relativităţii generale, într-un univers care se contractă, densităţile de energie cresc nelimitat – ceea ce nu se întâmplă în cosmologia cuantică cu bucle, unde grila are o capacitate finită de stocare a energiei, deci energia trebuie expulzată. Cum însă în afara universului nu există nimic către care energia să fie împinsă, creşterea în exces a energiei nu poate fi împiedicată decât prin oprirea prăbuşirii înseşi, cea care a provocat creşterea energici, şi transformarea ei în expansiune. În felul acesta, *mai puţin* timp în mulţimea discretă a momentelor înseamnă de fapt, graţie forţei care se opune prăbuşirii, *mai mult* timp dincolo de big bang.

Pentru un univers mare şi cu o densitate de energie scăzută, caracterul discret nu e important, dar el e esenţial la dimensiuni mici şi energii înalte. Caracterul discret al timpului face ca universul să arate ca o clepsidră: în partea lărgită de sus, nisipul pare că se scurge continuu – compoziţia granulară a nisipului nu joacă aici niciun rol dar la gâtuire vezi cum cade fiecare grăunte de nisip, iar timpul e măsurat discret, nu continuu – grăunte cu grăunte; în partea lărgită de jos, nisipul pare că se înalţă continuu.

Spre deosebire de cosmologia cuantică, al cărei timp se curge discret la nivel fundamental, o clepsidră doar *măsoară* timpul în mod discret. Cu un nisip tot mai fin, măsurarea timpului se apropie tot mai mult de una continuă. Dimensiunile grăunţelor sunt limitate de structura atomică a materiei, dar alte instrumente, de pildă orologiile atomice moderne, pot măsura timpul mult mai precis decât orice clepsidră. Cu aceste tehnologii, intervalurile de timp pot fi divizate mai departe,

însă, la nivelul teoriei cuantice a spaţiului-timp, toate încercările de a divide mai departe unităţile de timp se izbesc de o limită. Nu e într-adevăr nimic între două puncte atomice temporale succesive în reţeaua discretă a gravitaţiei cuantice.

La nivelul structurii discrete a timpului, evitarea singularităţii big bang se leagă şi de alt fenomen: existenţa unui timp înainte de big bang implică inversarea orientării spaţiale. E ca şi cum istoria universului înainte de big bang, privită din prezent, s-ar fi petrecut în oglindă. Un dreptaci supravieţuitor al big bang-ului ar deveni stângaci – spaţiul e inversat ca o sferă întoarsă pe dos. Universul în colapsare seamănă cu suprafaţa unui balon care se dezumflă. După un timp, în balon n-ar mai rămâne deloc aer – procesul încheindu-se, ca în cazul colapsului clasic al universului, cu o singularitate. Dar, dacă presupunem cât materialul din care e alcătuit balonul are proprietatea că părţile lui pot trece unele prin altele nestânjenite, după colaps balonul s-ar umfla la loc, iar direcţia indicând înainte spre interior ar indica acum spre exterior – orientarea s-ar schimba. În acelaşi fel, atomii spaţiali trec unii prin alţii la big bang şi inversează spaţiul.

Cum e posibil ca universul să evite colapsul total, spaţiul dispărând, pentru ca apoi să se întoarcă pe dos, ca o mănuşă? N-ar trebui oare ca spaţiul să se reducă la un punct în momentul inversării, sau măcar să ajungă la un volum nul, dacă prăbuşirea se desfăşoară anizotrop? Şi în acest caz, caracterul discret al timpului, combinat cu alte proprietăţi cuantice, joacă un rol esenţial. Balonul nu se dezumflă continuu, ci în salturi, ca într-un film cu un număr finit de cadre. Se dovedeşte că dinamica elementară a cosmologiei cuantice cu bucle, al cărei caracter discret se exprimă prin numărul finit de cadre, îl elimină automat pe acela care ar corespunde unui balon complet dezumflat. Chiar dacă încercăm să

aranjăm paşii timpului aşa încât momentul zero, când se ajunge la colaps total, să se afle într-unul dintre cadre, acel cadru e automat detaşat de celelalte şi nu conduce la o singularitate. Filmul rezultat prezintă un balon care se dezumflă, nu colapsează niciodată în întregime, se întoarce pe dos şi se umflă din nou.

În fine, în plus faţă de timpul discret, există şi un alt mecanism care produce o forţă repulsivă – un soi de dublă asigurare a teoriei cuantice împotriva prăbuşirii totale într-o singularitate. La distanţe mici, de la comportamentul clasic cunoscut se abate nu numai reţeaua spaţiului-timp, dar şi energia materiei. E momentul să ne aducem aminte de radiaţia corpului negru, aşa cum e ea explicată de Planck: conform fizicii clasice, densitatea de energie ar trebui să crească nelimitat la distanţe mici, oferind un exemplu de problemă ce conduce la o singularitate. Însă, conform calculelor lui Plack şi măsurătorilor directe, această creştere nu are loc. Teoria cuantică ne spune că energia nu se distribuie continuu, ci în mici pachete discrete – fotonii din care e alcătuită radiaţia. La lungimi de undă mici, corespunzând unor frecvenţe mari sau unor pachete de energie mari, fizica clasică ne spune că densitatea de energie a corpului negru diverge. Însă, din moment ce cantitatea totală de energie a radiaţiei e fixată, ea nu poate umple pachetele mari asociate lungimilor de undă mici. La lungimi de undă mici, sunt umplute mai puţine pachete, iar densitatea de energie începe să scadă; pentru cele mai mici, nu e prezentă nicio energie. Astfel, divergenţa nu apare.

Să ne gândim acum la materia dintr-un univers care colapsează. Când întreg universul se contractă, toate distanţele scad. În mod normal ne-am aştepta ca densităţile – obţinute prin împărţirea masei materiei la volumul unei regiuni – să crească. Dar, la fel ca în teoria cuantică a radiaţiei corpului negru, cosmologia cuantică cu bucle ne

arată că, într-un univers suficient de mic, mai puţină energie a materiei e distribuită în întreg spaţiul atomic: undele cuantice n-au destul loc. La fel ca în descrierea pe care Planck o dă radiaţiei termice dintr-o incintă, creşterea spre infinit a densităţilor e oprită de teoria cuantică şi se transformă într-o descreştere.

Dificultatea e acum mai puţin ameninţătoare. Dar, dacă universul continuă să colapseze, ecuaţiile lui pot deveni caduce şi la energii finite ale materiei. Oricum însă, apar forţe repulsive care se opun prăbuşirii. La urma urmei, energia materiei determină forma spaţiului-timp şi curbura lui, care determină forţa gravitaţională. Deşi forma clasică a energiei face ca gravitaţia să fie mereu atractivă, răsturnarea care are loc la distanţe mici într-un univers dens minuscul poate conduce la o redirecţionare a forţei – un mecanism suplimentar, independent, rezultând din cosmologia cuantică cu bucle. (Cele mai multe scenarii big bang din teoria corzilor se bazează pe asemenea efecte legate de materie, fără o analiză a structurii spaţiului-timp). [46]

Asemenea contra-forţe nu sunt un rezultat întâmplător, ci un fenomen comun în acest tip de gravitaţie cuantică. Ele nu apar doar în anumite cazuri particulare – de pildă, în soluţiile analizate numeric într-o serie de articole din 2006 ale lui Ashtekar, Tomasz Pawlowski[47] şi Parampreet Singh, – ci pot fi întâlnite în numeroase situaţii. Totuşi, aceste fenomene n-au fost încă studiate exhaustiv. Deocamdată nu s-a demonstrat că în gravitaţia cuantică cu bucle apar în chip necesar contra-forţe suficient de puternice pentru a învinge singularitatea.

Despre folosirea matematicii – un exemplu:
Trecerea prin starea infernală

Gravitaţia cuantică cu bucle determină stările unor spaţii tridimensionale de mărimi diferite prin funcţii de undă care descriu geometria obişnuită a suprafeţelor şi volumelor într-un mod cuantic, fluctuant. Nu toate mărimile spaţiale sunt posibile, ci există un set discret de mărimi, la fel ca în cazul energiilor atomului. Când ţesătura spaţială de bucle se extinde printr-un nou nod, volumul total se modifică cu o cantitate bine determinată.

În general, valorile permise ale volumului unei „spume" spaţiale aflate în fluctuaţie la scara cea mai mică sunt greu de calculat. Acest lucru se poate vedea în figura 15, care prezintă valorile volumului în funcţie de un parametru care determină asimetria. În ciuda rezultatelor recente obţinute de Johannes Brunnemann şi David Rideout, nu dispunem încă de o imagine completă pentru cazul general. Chiar şi structuri spaţiale care par uniforme la scară cosmică sunt construite pe cale atomică, la fel cum corpurile materiale sunt alcătuite din bine-cunoscuţii atomi. Să construieşti în cadrul unei descrieri matematice un obiect macroscopic – fie el cristal sau doar o bucată de spaţiu gol – din atomi individuali, păstrând controlul deplin asupra proprietăţilor sale cum sunt energia sau volumul, este o întreprindere extrem de complicată.

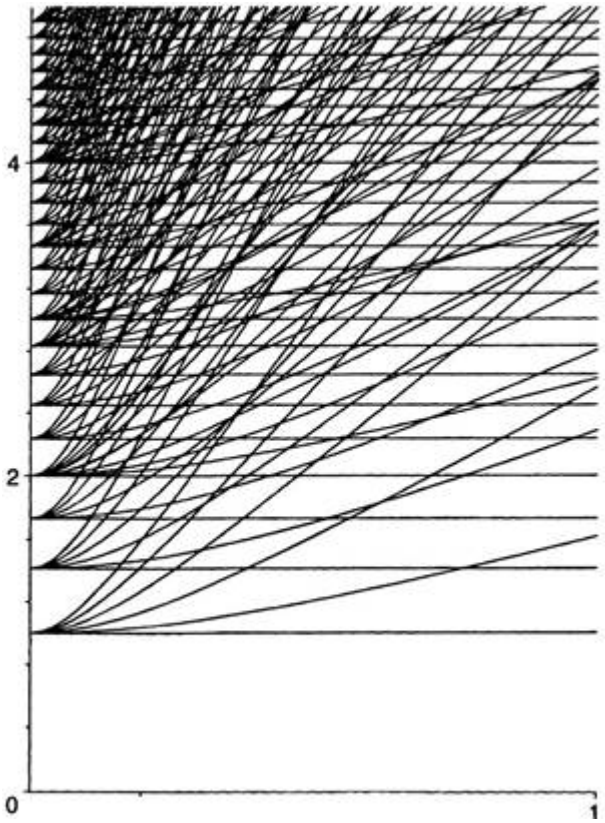


Figura 15. *Scara (spectrul) volumului atunci când asimetria creşte continuu de-a lungul axei orizontale. În stânga, spectrul e regulat şi simplu de calculat; în dreapta, e tot mai complicat. Această despicare a nivelelor analogă celei din spectrele de energie ale atomilor atunci când aceştia se află, de pildă, într-un câmp magnetic care rupe simetria iniţială.*

Din fericire însă, nu întotdeauna e nevoie să ai un control deplin. Dacă ne preocupă, de pildă, comportamentul la scară mare al expansiunii cosmice, apar simplificări esenţiale, iar astfel spectrul tuturor valorilor posibile poate fi calculat concret şi în detaliu. Mai mult, fiecărei valori a volumului îi corespund doar două stări, cu excepţia volumului nul al singularităţii, căruia îi corespunde o singură stare.

Când am studiat pentru prima dată aceste structuri în cosmologia cuantică cu bucle, am fost uimit de această dublare, însă există o explicaţie limpede: o stare e caracterizată nu numai prin volum, dar şi prin orientare; spaţiul şi copia lui

întoarsă pe dos nu sunt unul şi acelaşi lucru. În două dimensiuni, ne putem gândi la un balon care poate fi umflat în două moduri: suflând pur şi simplu aer în el sau întorcându-l pe dos şi abia apoi suflând aer în el. Această imagine e în acord cu faptul că volumului nul îi corespunde o singură stare, căci un spaţiu lipsit de întindere nu are un interior aşa încât să poată fi întors pe dos. În termeni matematici, acest grad de libertate se numeşte orientare a spaţiului.

O problemă mai complicată încă decât cea a valorilor pe care le poate lua volumul este cea a dinamicii, a comportamentului în timp: având valorile volumului, cunoaştem scara pe care universul creşte, dar cum anume o urcă? Cât de repede se extinde? Poate fi accelerat? Sau, dând timpul înapoi pentru a ne apropia de singularitatea big bang, cum coboară universul către dimensiuni mici? Ce se întâmplă când ajungem la starea unică de volum nul?

După ce am analizat dublarea stărilor datorată orientării, am înţeles ce semnificaţie ar putea avea aceasta pentru dinamica universului. În loc să considerăm mulţimea tuturor volumelor ca pe o pereche de axe pozitive unidirecţionale, fiecare pornind de la singularitate, le putem dispune pe o singură axă, cu valori pozitive şi negative, starea unică de volum nul aflându-se acum la mijloc, şi nu la capătul din stânga. Orientarea e într-adevăr descrisă printr-un semn, care determină dacă starea e contabilizată ca pozitivă sau negativă. Nu mai avem două scări separate, ci una singură care trece prin singularitate.

Curând s-a dovedit că evoluţia în timp a universului se desfăşoară într-adevăr pe această scară lungă. Impunând condiţiile simetrice pentru un univers de dimensiuni cosmice, am reuşit în cele din urmă să simplific suficient ecuaţia dinamică – obţinută de Thiemann pentru stări generale – aşa încât să găsesc soluţii. Este o

ecuaţie cu diferenţe cu o formă compactă, folosită acum în numeroase lucrări ştiinţifice:

$$C_{+}\Psi_{n+1} + C_{0}\Psi_{n} + C_{-}\Psi_{n-1} = \hat{H}\Psi_{n}$$

Aici, Ψ_n reprezintă starea universului – funcţia de undă – la diferite valori ale lui *n,* care sunt treptele scării: valorile volumului, împreună cu un semn care dă orientarea, pentru a indica de care parte a scării ne aflăm.

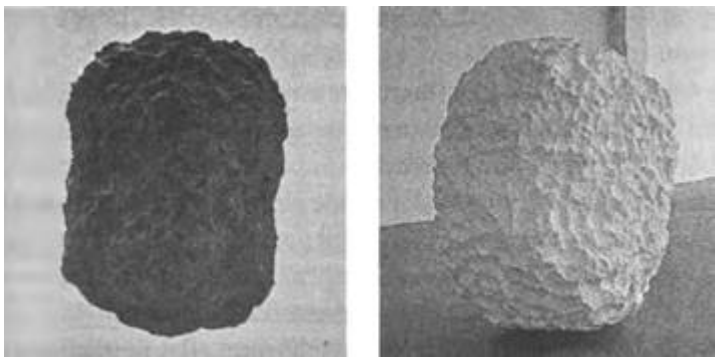


Figura 16. *Două reprezentări ale spaţiului, care par să fie una inversa celeilalte.* (Universo positivo [Univers pozitiv], *2002-2006;* Universo negativo [Univers negativ], *2002–2004. Sculpturi şi fotografii: Gianni Caravaggio.)*

Mai sunt apoi coeficienţii C_{+}, C_{0}, şi C_{-} a căror formă asigură corespondenţa corectă cu ecuaţia lui Einstein, şi $\hat{H}$, care descrie conţinutul de materie al universului. Ecuaţia leagă între ele stări de diferite mărimi, oferindu-ne informaţii despre creşterea cuantică a universului: putem rezolva ecuaţia pentru Ψ_n, valoarea la treapta n+1, dacă ştim valorile pentru precedentele trepte n şi n-1. Dacă pentru funcţia de undă specificăm două valori iniţiale, le obţinem pe toate celelalte, lăsându-l pe n să parcurgă valorile întregi. După cum arată soluţiile generale ale ecuaţiei, creşterea nu încetează atunci când n ia valoarea zero a singularităţii. La singularitate, doar ecuaţiile clasice ale gravitaţiei devin caduce; cosmologia

cuantică supravieţuieşte. Spaţiul discret se poate întoarce pe dos fără probleme, şi-şi urmează calea.

Aşadar, ce s-a întâmplat de fapt înainte de big bang?

Întrebarea ultimă

Nu e posibilă nicio observare directă a universului înainte de big bang. În starea extrem de compactă din vecinătatea punctului de ricoşeu, universul timpuriu era prea opac pentru ca lumina sau alte forme de radiaţie electromagnetică să ajungă până la noi. Primul moment vizibil pe această cale a venit după aproximativ 380.000 de ani de expansiune. Universul crescuse pe atunci suficient de mult pentru a fi răcit şi diluat materia, făcând spaţiu transparent. Într-un univers aflat în continuare la temperaturi înalte, aproximativ 4000°C, materia radia ca un corp strălucitor, asemănător suprafeţei unei stele. Înainte, materia universului era încă mai densă şi mai fierbinte şi radia în acelaşi fel, însă radiaţia era direct reabsorbită în plasma incandescentă a universului timpuriu. Aşa cum nu putem vedea decât suprafaţa Soarelui, nu şi interiorul lui, nu putem privi nici în urmă, oricât de departe în timp, spre big bang.

Impenetrabilitate: Prin ceaţa trecutului

Abia după ce materia fierbinte s-a diluat şi s-a răcit suficient, radiaţia a început să călătorească spre noi prin universul aflat în expansiune. La fel cum într-o ceaţă deasă se condensează picăturile de ploaie, făcând ca vizibilitatea să crească treptat, sub temperatura de 4000°C în universul timpuriu s-au format atomi neutri. Neavând o sarcină electrică netă, atomii împrăştie mult mai slab lumina decât electronii şi protonii nelegaţi. Urme ale radiaţiei eliberate după un timp suficient de expansiune pot fi observate, cu antene sensibile, ca radiaţie cosmică de fond. Ele sunt unele dintre cele mai importante surse de informaţii despre universul timpuriu, după cum vom vedea mai amănunţit în capitolul următor.

Toate acestea s-au petrecut mult după big bang, şi ne pot oferi, în cel mai bun caz, indicii indirecte privind forma universului de dinainte. Alţi mesageri, interacţionând mai slab cu materia decât undele electromagnetice, ne pot oferi însă informaţii mai vechi. Pe de altă parte, aceşti mesageri trebuie să fie suficient de robuşti şi să supravieţuiască suficient de mult ca să nu se dezintegreze în lunga lor călătorie până la noi. Rămân doar două posibilităţi: neutrinii şi undele gravitaţionale.

Neutrinii sunt particule elementare care, spre deosebire de electroni, sunt neutri electric şi au masă aproape nulă. Ei sunt creaţi în dezintegrări radioactive şi au jucat un rol important în universul timpuriu. Spre deosebire de fotoni, purtătorii radiaţiei electromagnetice, neutrinii sunt cu greu absorbiţi de materie – ceea ce se poate vedea din faptul că neutrinii produşi în reacţiile de fuziune din adâncul Soarelui ajung pe Pământ, însă vedem

doar lumina de la suprafaţa Soarelui, acolo unde temperatura e prea scăzută pentru fuziune. Majoritatea neutrinilor străbat planeta – spre deosebire de lumină, îi putem detecta şi pe timpul nopţii. Pe de altă parte, din cauza interacţiei lor extrem de slabe cu materia, observăm doar o mică fracţiune din numărul total de neutrini. Cunoscând ratele de producţie a neutrinilor, putem estima că, pretutindeni în univers, inclusiv pe Pământ, într-un metru cub de spaţiu se află aproximativ 30 de milioane de asemenea particule. Masa lor mică face ca, în ciuda numărului lor uriaş, toţi neutrini produşi în universul timpuriu să contribuie cu doar un procent la densitatea totală a universului.

Datorită slabei lor interacţii cu materia, neutrinii pot ajunge la noi din timpuri mai vechi decât lumina. Dacă lumina a putut străbate spaţiul abia la mii de ani după big bang, neutrinii au făcut-o doar după aproximativ o secundă! Cu un telescop neutrinic, ni s-ar dezvălui o perioadă mult mai veche a universului, însă faptul că neutrinii interacţionează slab cu materia are dezavantajul că îi face dificil de detectat. Un telescop neutrinic care să ne permită să vedem o parte însemnată din neutrini, eventul să determinăm şi direcţia din care provin, rămâne o pură fantezie în condiţiile tehnologiilor de azi.

A doua posibilitate ne e oferită de undele gravitaţionale: mici perturbaţii ale spaţiului-timp care se propagă cu viteza luminii. Ele sunt generate, de pildă, în ciocnirile dintre corpuri masive, cum sunt stelele netronice sau găurile negre; masele influenţează spaţiul-timp şi curbura lui. O parte din curbură se poate desprinde din zona de impact şi poate avansa în spaţiu ca lumina care părăseşte o stea. Trecerea unei unde gravitaţionale s-ar anunţa prin minuscule modificări periodice ale distanţelor dintre obiecte, căci undele gravitaţionale propagă perturbaţii ale spaţiului-timp. Dacă am fi în stare să măsurăm

distanţele cu mare precizie, am putea detecta unde gravitaţionale. Asemenea detectori se construiesc în prezent în mai multe locuri din lume: observatoarele LIGO din Louisiana şi Washington, Virgo în Italia, GEO600 în Germania şi TAMA în Japonia.

E nevoie de mase foarte mari pentru a genera unde gravitaţionale suficient de puternice. Detectarea directă a semnalelor tipice care pot ajunge pe Pământ necesită o precizie în măsurarea lungimilor de o miime din raza unui proton. Oricât de straniu ar părea, dispozitive ingenioase se apropie de acest obiectiv, iar metodele sunt permanent îmbunătăţite. Se speră ca detecţia directă să fie cu putinţă în următorii câţiva ani.[48] Deşi nu s-a reuşit până acum acest lucru, existenţa undelor gravitaţionale nu e pusă la îndoială. După cum am arătat în capitolul consacrat relativităţii generale, pierderea de energic a pulsarilor dublii poate fi explicată prin emisia de unde gravitaţionale, conform ecuaţiilor lui Einstein. Aceasta e una dintre cele mai precise confirmări experimentale a unei teorii din întreaga fizică. Totuşi, mai e o cale lungă şi grea până să se construiască un telescop pentru undele gravitaţionale. Sunt planuri pentru un sistem satelit, LISA, care ar putea atinge acest obiectiv, precum şi pentru un telescop subteran, botezat ET – Einstein Telescope. Vor mai trece ani buni până la realizarea acestor planuri, iar, pentru a putea privi direct către big bang, nici măcar aceste sisteme nu vor fi destul de sensibile. Totuşi, perspectivele unei noi astronomii, care, spre deosebire de cea convenţională, nu se bazează pe radiaţia electromagnetică, sunt impresionante.

În cosmologia universului timpuriu, energiile înalte ale big bang-ului limitează strict chiar şi propagarea neutrinilor şi undelor gravitaţionale. La asemenea densităţi de energie, universul e opac până şi faţă de mesagerii care interacţionează cel

mai slab. Tot nu ni se permite accesul direct la universul dinainte de big bang, dar o investigare indirectă nu este exclusă.

Existenţa unei faze anterioare de colapsare, în combinaţie cu forţele repulsive ale gravitaţiei cuantice din timpul fazei de ricoşeu, ar trebui să aibă o slabă influenţă asupra expansiunii ulterioare. Asemenea efecte asupra fazelor târzii ale big bang-ului pot fi calculate pe baza modelelor teoretice, fiind eventual confirmate prin observaţii.

Pentru a pune în evidenţă efecte indirecte fine este nevoie de o înţelegere amănunţită a teoriei şi de soluţii exacte ale ecuaţiilor. În prezent, nici programele de calculator nu sunt suficient de avansate ca să ne ofere valori demne de încredere pentru efectele aşteptate. Dar când teoria va mai progresa, iar măsurătorile vor deveni mai precise, nu e exclus să avem acces la observaţii indirecte. Vom reveni la acest subiect în capitolele dedicate cosmologiei observaţionale şi cosmogoniei.

Uitarea cosmică: Amintiri înceţoşate

> Cât i-a ajutat.
> Cu marea sa putere de titan,
> Să-i ocrotească ţara de duşman?
> El vru să facă un imperiu-anume
> Doar din soldaţi. S-aprindă-ntreaga lume
> În care, cu a oştilor bravură,
> Orice să îndrăznească.
>
> Schiller, *Wallenstein*[49]

Ce ne spun în fond consideraţiile teoretice? Independent de observaţii, teoriile sunt uneori atât de stricte, încât unele posibilităţi, la care altminteri ne-am putea gândi, sunt de la bun început eliminate. Deşi ecuaţiile gravitaţiei cuantice rămân incomplete – teoriile n-au fost formulate până la capăt – condiţiile de consistenţă matematică pot limita posibilităţile. Dacă am cunoaşte cu precizie starea prezentă a universului, folosind toate ecuaţiile matematic posibile pentru cosmologia cuantică, am putea face calcule care să ne ducă înapoi în timp înainte de big bang. Pornind de la ecuaţii diferite, obţinem rezultate diferite, dar, dacă ele nu diferă prea mult în întregul ansamblu al ecuaţiilor posibile, ne putem face o idee despre starea universului înainte de big bang. Într-un fel, asta seamănă cu ceea ce fac istoricii, după cum spune Friedrich Schiller în cursul lui inaugural[50] de la Universitatea din Jena:

> Din ansamblul acestor întâmplări, istoricul le alege pe acelea care au avut o influenţă esenţială, limpede şi lesne de urmărit asupra înfăţişării actuale a lumii şi asupra situaţiei generaţiilor care trăiesc în prezent. În adunarea materialului pentru istoria universală trebuie deci avută în vedere relaţia

> dintre datele istorice şi starea actuală a lumii. Istoria universală porneşte aşadar de la un principiu radical opus obârşiei lumii. Succesiunea reală a evenimentelor se desfăşoară de la originea lucrurilor până la cea mai recentă rânduială a lor; istoricul universal înaintează de la starea de fapt din prezent către origini. Când gândul său urcă din anul şi veacul în care trăieşte spre vremurile apuse şi evenimentele oferite de acestea – care le explică pe cele ulterioare pe măsură ce-şi continuă drumul pas cu pas către începuturi, nu începuturile lumii, căci pentru acestea nu există vreo piatră de hotar – până la primele statui, atunci el poate urma drumul invers, poate coborî nestânjenit, călăuzit de faptele descrise, de la primele statui la epoca actuală.

Nu trebuie să ne mire paralela cu istoria, căci cosmologia se ocupă cu studiul unui anumit gen de istorie, aceea a universului. Putem ajunge mult mai departe înapoi în timp, cercetând noi tipuri de statui; radiaţia cosmică de fond, distribuţia galaxiilor în univers şi supernovele (despre care vom vorbi în capitolul următor). În cosmologie, aceasta se numeşte abordare „de sus în jos”: cunoaşterea porneşte de la capătul de sus al axei timpului şi încearcă să deducă proprietăţile dintr-un moment anterior, situat mai jos. Perspectiva aceasta apare răsturnată în raport cu cea a lui Schiller, pentru că, în mod tradiţional, în diagramele matematice sensul timpului e de jos în sus (sau de la stânga la dreapta). În cosmologie, această abordare a fost introdusă de Jim Hartle şi Stephen Hawking şi a primit recent o formă riguroasă graţie lui Hawking şi Thomas Hertog.[51]

Din cauza dificultăţii de a observa întreg universul, nu cunoaştem foarte precis starea actuală şi, oricum, n-o putem cunoaşte cu o precizie oricât de mare din cauza nedeterminării cuantice care afectează funcţia de undă cosmologică. Întrebarea esenţială este deci în ce măsură ignoranţa noastră privind starea actuală a universului influenţează cunoaşterea stării dinainte

de big bang, la care am putea ajunge desfăşurându-ne calculele înapoi în timp. Sau, altfel spus: în afară de radiaţia cosmicii de fond, câte statui putem găsi în universul timpuriu? S-ar putea ca ignoranţa să fie aproximativ constantă în timp, permiţându-ne să ajungem la o precizie acceptabilă în cunoaşterea comportamentului dinainte de big bang; în raport cu starea din prezent, ignoranţa ar spori doar pe seama cunoaşterii imprecise a ecuaţiilor cosmologice cuantice. S-ar putea însă la fel de bine ca până şi o formă fixată a ecuaţiilor să conducă la o creştere importantă a nedeterminării când ne îndreptăm spre trecut. Un asemenea comportament apare la sistemele numite pe drept cuvânt haotice: pornind de la condiţii iniţiale foarte apropiate, evoluţiile lor conduc în scurt timp la rezultate flagrant diferite. Un exemplu îl constituie sistemele turbulente din hidrodinamică – teoria curgerii lichidelor, în care haosul explică de ce nu se pot face predicţii pe termen lung demne de încredere.[52]

Haosul joacă un rol şi în cosmologie, dar, în principalele aspecte de interes aici, îl putem ignora. În cele mai simple modele ale relativităţii generale, volumul total se modifică pe o cale nehaotică, ceea ce ne îndreptăţeşte speranţele de a duce la bun sfârşit aventura întoarcerii în timp, însă rămâne de văzut dacă nu cumva ecuaţiile cosmologiei cuantice nu introduc o nedeterminare suplimentară.

Dar ce tip de incertitudine cuantică putea să fi existat înainte de big bang? Forţele repulsive ale gravitaţiei cuantice evită singularitatea, salvează spaţiul-timp de la distrugere şi fac posibilă existenţa unei lumi înainte de big bang. Ca teorie cuantică însă, gravitaţia cuantică prezintă aspecte tipice precum fluctuaţiile şi nedeterminarea. Acest comportament ar putea rămâne dominant chiar şi la momente îndepărtate de big bang. Ne închipuim că spaţiul-timp nesingular de la big bang

„ricoşează” atunci când volumul universului atinge valoarea minimă, dar în realitate vorbim despre o versiune cuantică a spaţiului-timp, căci fără teoria cuantică am avea de-a face cu o singularitate.[53] Aceasta ar trebui să conducă la fluctuaţii neîntâlnite în lumea clasică. Forţele cuantice sunt bine-venite, dar ele aduc cu sine o agitaţie neclasică. După ce a făcut ca singularitatea să fie evitată, menţine oare lumea cuantică spaţiul-timp într-un haos fluctuant – la fel ca o armată de mercenari care, după ce a respins un agresor periculos, jefuieşte ţara devastată?

Analizând modelele de care dispunem, vedem că multe dintre proprietăţile universului pot fi deduse destul de precis efectuând calculele înapoi în timp. Multe, dar nu toate. Există mărimi fizice relevante pentru unele întrebări interesante, ale căror valori înainte de big bang au o influenţă atât de slabă asupra evoluţiei ulterioare, încât ele sunt irelevante pentru starea actuală. În cazul acesta, asupra valorilor dinainte de big bang nu pot fi impuse restricţii prin condiţiile ce s-ar obţine extrapolând spre trecut valorile din prezent.

Universul „uită” deci valoarea exactă pe care asemenea mărimi au avut-o înainte de big bang. Chiar dacă valoarea ar putea în principiu avea un efect asupra comportamentului universului, influenţa e atât de slabă, încât valoarea e irelevantă. Nu s-ar regăsi în niciun fenomen, e ca şi cum ar fi uitată. Exemplul cel mai grăitor de proprietate uitată este gradul de incertitudine cuantică. Graţie forţelor repulsive ale gravitaţiei cuantice, big bang-ul nu mai e singular, ca în relativitatea generală, dar rămâne un moment aparte. Valoarea ce caracterizează fluctuaţiile cuantice pentru o lungă perioadă înainte de big bang a devenit, după big bang, neesenţială; fluctuaţiile cuantice erau determinate acum de un nou parametru, în mare parte independent de cel vechi. Deşi vechea valoare influenţează încă

detalii minuscule ale evoluţiei, practic ea nu mai poate fi reconstituită prin observaţii.

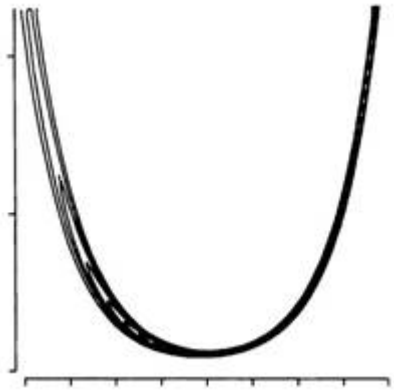


Figura 17. *Ilustrarea unei funcţii de undă pentru un univers nesingular. Curbele de nivel reprezintă valorile funcţiei de undă în funcţie de volum (pe verticală) şi timp (pe orizontală). Axa orizontală, corespunzând unui volum nul, nu e atinsă – nu se ajunge la singularitate. Fluctuaţiile cuantice, reprezentate de lărgimea crestei, dinainte de atingerea volumului minim pot fi diferite de cele de mai târziu. Pe aceasta se bazează „uitarea" cosmică: intensitatea fluctuaţiilor cuantice dinainte de big bang nu poate fi reconstituită cu uşurinţă după big bang.*

Cu alte cuvinte, în ce priveşte aceste proprietăţi nedeterminate, starea universului putea diferi mult faţă de ceea ce vedem azi. Semnificaţia lor fizică dezvăluie natura cuantică a universului: dacă proprietăţi clasice precum volumul sau rata de expansiune pot fi determinate destul de precis, nu la fel stau lucrurile cu nedeterminarea cuantică a acestor cantităţi. În principiu, universul dinainte de big bang putea să fi fost mult mai nebulos decât este în prezent, sau volumul lui putea să fi fluctuat mult mai mult. Prin urmare, cunoaşterea stării originare a universului e aproximativă, dacă nu cumva suntem în măsură să facem presupuneri suplimentare în privinţa ei. Deşi cosmologia cuantică poate lămuri probleme legate de univers pe căi încă neabordate, ea lasă loc şi pentru mituri.

Limite:
Nu există oare niciun răspuns ultim?

Limitele limbajului meu sunt limitele lumii mele.

Ludwig Wittgenstein,
Tractutus Logico-Philosophicus

Cosmologia cuantică cu bucle a pus în evidenţă forţe de respingere care împiedică prăbuşirea în singularităţi. Rezultatele obţinute deocamdată se bazează pe modele suficient de simple pentru a fi tratate cu metode matematice, altminteri comportamentul prezentat mai sus n-ar fi putut fi pus în evidenţă. Acest procedeu e deseori întrebuinţat în fizica teoretică: începem cu cel mai simplu model caracterizând o situaţie, urmând ca extinderile lui să-l facă să devină mai realist. În cosmologia cuantică, de pildă, putem să considerăm diferite tipuri de materie sau să facem mai puţine presupuneri privind simetria. Într-o asemenea situaţie, întrebarea inevitabilă este dacă rezultatele obţinute cu modelul simplu sunt general valabile sau trebuie revizuite prin modelele extinse. Această problemă apare şi în legătură cu afirmaţii din cosmologia cuantică precum cele despre forţele repulsive sau „uitarea" cosmică asociată lor, ambele apărând în anumite modele, fără ca existenţa lor să fie demonstrată în cazul general.

E o mare diferenţă între enunţurile negative privind ceea ce putem cunoaşte, cum e „uitarea" cosmică, şi rezultatele concrete care sunt obţinute în asemenea modele. Un exemplu pentru acestea din urmă este densitatea specifică într-un model simplu al universului, în momentul ricoşeului. În

situaţii simplificate pot fi efectuate multe calcule, dar se pune mereu întrebarea dacă rezultatele sunt demne de încredere în condiţii realiste, mai greu de încorporat în model. Dimpotrivă, „uitarea" cosmică se referă la limitele cunoaşterii. Asemenea rezultate sunt mai puţin concrete, dar e mai probabil să rămână valabile atunci când modelele sunt extinse. La urma urmei, o versiune extinsă nu face decât să complice modelul iniţial, altminteri am fi luat de la bun început în considerare modelul mai complex. Dacă deja în cazul unui model simplu cunoaşterea e limitată, acest lucru rămâne valabil şi în cazul general. Putem deci considera că „uitarea" cosmică e o proprietate generală.

În genere, fizicienii nu suportă ideea de limite ale cunoaşterii. Succesul perspectivei deterministe a întărit credinţa comună în ea; contestarea ei e privită cu scepticism. „Uitarea" cosmică este o asemenea contestare, şi a fost criticată. Majoritatea contraargumentelor prezentate până acum sunt însă încercări disperate în stilul paradoxurilor lui Zenon, şi nu sunt valabile, din moment ce se foloseşte abuziv noţiunea de infinit. Unul dintre ele arată în felul următor: se prea poate ca incertitudinea totală să nu poată fi determinată, dar există multe, ba chiar o infinitate de alte proprietăţi ce caracterizează un univers cuantic. Un parametru incert dintr-o infinitate de proprietăţi nu înseamnă aproape nimic, prin urmare nimic nu e uitat.

Faptul că acest argument e absurd devine evident dacă îl aplicăm uitării omeneşti: e ca şi cum am spune că avem cu toţii o memorie perfectă! S-ar putea ca din când în când să uităm câte ceva, dar există o infinitate de informaţii pe care nu ne batem capul să le memorăm şi pe care, strict vorbind, nu le uităm. Iar un număr finit raportat la o infinitate însemnă practic zero, prin urmare ţinem minte totul. Folosirea abuzivă a noţiunii de infinit este şi aici evidentă, dar e mai puţin stângace ca în paradoxurile lui Zenon. Apoi,

e şi un alt motiv pentru care argumentul nu e valabil: există o infinitate de stări ale universului înainte de big bang care nu pot fi reconstituite în prezent. Gradul de incertitudine e determinat doar de trei parametri, dintre care unul e relevant astăzi, altul în faza big bang, iar al treilea înainte de big bang. În mod realist, nu putem spera să determinăm decât valoarea relevantă astăzi, aşa încât, din trei parametri, universul uită doi.

Deşi o teorie cuantică a gravitaţiei poate evita singularitatea big bang – ceea ce reprezintă deja un succes –, asta nu înseamnă neapărat că putem determina totul despre univers şi originea lui. În cosmologia teoretică apelăm deseori la modele simple de univers, în care pot fi calculaţi cu precizie parametri precum densitatea de energie sau temperatura la momentul extinderii sale minime. Dacă proprietăţile speciale apărute prin simplificare sunt răspunzătoare pentru această precizie, rezultatele nu pot fi considerate general valabile.

Chiar dacă o întreagă clasă de modele conduce la afirmaţii asemănătoare, nu putem fi siguri în privinţa gradului lor de generalitate. Trebuie să fim conştienţi de efectele selecţiei, ca în parabola lui Arthur Eddington cu pescarii: doi pescari stau de vorbă după ce-au aruncat năvoadele. Unul observă că, deşi peştii pe care îi prind au diferite dimensiuni, niciodată n-a găsit în plasă un peşte mai mic de un centimetru. Celălalt zice că nu-i de mirare, fiindcă, înainte de a înota liber prin mare şi a fi prins în năvod, peştele iese dintr-un ou; şi de aici trage concluzia că, atunci când ies din ou, peştii de toate speciile trebuie să aibă cam un centimetru.

Acesta e un exemplu de raţionament aparent valabil, dar fals. Evident, pescarii n-au ţinut cont de dimensiunile fixe ale ochiurilor năvodului care poate scoate ia suprafaţă doar peşti de o anumită dimensiune. Peştii mai mici pur şi simplu nu sunt

prinşi. Avem de-a face aici cu un efect al selecţiei, căci metoda determină o proprietate a rezultatului. În mod asemănător apar efecte ale selecţiei în modelele cosmologice care impun proprietăţi specifice pentru o analiză detaliată în cazuri particulare. Este deci greu de ştiut dacă însăşi condiţia de a se putea obţine soluţii matematice nu determină cumva, cel puţin parţial, rezultatul. Putem analiza diferite modele, dar e nevoie de un număr mare de cazuri caracteristice pentru a ajunge la un rezultat demn de încredere. Dată fiind complexitatea chiar şi a celor mai simple modele din cosmologia cuantică, acest lucru e posibil doar în puţine situaţii.

Există şi o abordare mai fructuoasă, care e însă mai puţin atrăgătoare. În loc să ne concentrăm asupra proprietăţilor exacte, cum e valoarea precisă a unei anumite mărimi, putem adopta o perspectivă pesimistă, încercând să vedem ce limite apar în determinarea unui parametru. Pentru modele simple, aceste limite pot fi calculate cam la fel ca valorile precise, dar rezultatele sunt în mai mică măsură supuse constrângerilor. Totuşi, în anumite cazuri, de pildă în cel al fluctuaţiilor cuantice ale universului înainte de big bang, apar limitări surprinzătoare chiar şi în modelele simple, iar ele devin cu atât mai puternice în situaţii generale, ceea ce ne face să le considerăm drept proprietăţi generale.

Această perspectivă pesimistă nu trebuie interpretată ca o abdicare. Limitele joacă un rol important în ştiinţă, şi ele trebuie clar recunoscute. Abia apoi vom vedea cum se poate progresa în cadrul acestor limite, sau dacă e posibil să le transgresăm.

În modele simple, pot fi calculate valori precise, uneori cu uşurinţă, alteori cu mare efort. Există mai multe modele decât ne închipuim în care pot fi găsiţi parametri calculabili, ceea ce reprezintă pentru cercetători o sursă bogată de articole

ştiinţifice. Mai ales în etapele de început ale unui nou domeniu rămân deschise numeroase posibilităţi pentru calcule concrete, numai că potopul de date nu stimulează neapărat o mai profundă înţelegere. Deseori, rezultate cunoscute sunt pur şi simplu reproduse într-un model uşor modificat, fără să ştim dacă o asemenea proprietate e general valabilă sau e rezultatul efectului selecţiei. Trecerea la abordarea „pesimistă", aşa cum s-a constatat recent în gravitaţia cuantică cu bucle, este deci semnul maturităţii unui domeniu ştiinţific. Începem prin a lua limitele în serios şi ne orientăm spre rezultate mai generale în cadrul teoriei studiate. În plus, recunoaşterea limitelor reprezintă un act de onestitate în ştiinţă.

CAPITOLUL 5.
Cosmologia observaţională. Sondarea întregului univers, a trecutului şi viitorului

Orice teorie privind spaţiul şi timpul trebuie să fie în concordanţă cu ceea ce vedem din întreg universul. Cosmologia modernă s-a născut în anii 1920, odată cu contribuţia de pionierat a lui Edwin Hubble, dar vreme de decenii a rămas o ştiinţa imprecisă. Se făceau estimări pentru majoritatea mărimilor ce caracterizează forma universului, cum e de pildă rata de expansiune (numită acum parametru Hubble), dar noi date le modificau cu un factor de doi sau chiar mai mare. În cele din urmă. prin metodele mai fine ale tehnologiilor avansate, situaţia s-a schimbat. Mai cu seamă în ultimul timp, cosmologia observaţională a progresat enorm, făcându-ne să înţelegem mai bine universul, iar acum este unul dintre domeniile cele mai pasionante ale fizicii.

Cosmologia joacă un rol aparte în cadrul fizicii, pentru că universul reprezintă un sistem sui-generis. El n-a fost „preparat” de vreun experimentator, aşa încât procedeul obişnuit – generarea multor sisteme similare, cum sunt grupurile de particule elementare în reacţiile din acceleratoare, pentru a măsura în mod repetat proprietăţile lor – este exclus. Metodele folosite acum în fizica experimentală ne permit să reducem mult erorile de măsurare care pot apărea atunci când experimentul e efectuat o singură dată. În

cazul universului, cu totul alta e situaţia: cosmologii trebuie să accepte ceea ce universul le prezintă o dată pentru totdeauna.

În cosmologie nu se pot face decât observaţii, prepararea e imposibilă. Unele observaţii sunt deci afectate de erori care nu pot fi complet eliminate. Nu e întotdeauna limpede dacă o valoare măsurată a fost obţinută din întâmplare sau dintr-un motiv temeinic. În cazul experimentelor repetate, putem lesne detecta şi elimina rolul hazardului, fiindcă acesta nu poate genera efecte sistematice. În cosmologie, repetiţiile sunt imposibile.

Parametrii cosmologici au deseori valori surprinzătoare care cer imperios o explicaţie mai profundă. De pildă, după cum vom valea în curând, universul şi-a accelerat expansiunea relativ recent, după cum reiese din vitezele cu care se îndepărtează stelele aflate la mare distanţă, care explodează. Se spune în glumă că accelerarea asta se leagă de apariţia vieţii inteligente în stare s-o perceapă. De unde ştim însă că n-avem de-a face cu un rezultat întâmplător? Cauza accelerării (misterioasa „materie întunecată”) nu e încă înţeleasă, ceea ce complică şi mai mult lucrurile.

Trebuie să ţinem cont totuşi de faptul că asemenea coincidenţe pot apărea, iar uneori li se atribuie o importanţă exagerată. De pildă, există o potrivire atât de bună între raza Lunii, cea a Soarelui şi razele orbitelor Pământului şi Lunii, încât sunt cu putinţă eclipse aproape totale. Dacă rapoartele dintre ele ar fi fost altele, Luna ar fi fost prea mică pentru a acoperi Soarele complet, fiind copleşită de strălucirea lui, sau ar fi fost prea mare, făcând ca în timpul eclipsei Soarele să dispară pentru mai multă vreme.

Mărimea aparentă a Lunii şi cea a Soarelui pe cer sunt aproape egale, ceea ce face ca în timpul eclipselor totale să se vadă coroana solară. Aceste evenimente au jucat un rol important în culturile străvechi, iar încercarea de a le prezice a stimulat

dezvoltarea astronomiei. Astăzi ştim totuşi foarte bine că potrivirea e pur întâmplătoare. Mai mult, Luna se îndepărtează încet de Pământ din cauza transferului de energie prin maree. (În acest caz, expansiunea cosmică nu joacă niciun rol, fiindcă efectele ei sunt copleşite de legătura gravitaţională dintre Pământ şi Lună.) Avem deci de-a face cu o dublă coincidenţă, rezultat al proprietăţilor neesenţiale ale orbitelor Pământului şi Lunii în sistemul solar şi al momentului în care ne efectuăm observaţiile.

Există numeroase asemenea exemple în cosmologie. În ultimii ani însă, în cosmologia observaţională s-au găsit metode ingenioase de examinare a măsurătorilor complementare şi s-a ajuns la o precizie remarcabilă. Acesta e subiectul capitolului de faţă, în care accentul va cădea asupra proprietăţilor legate de gravitaţia cuantică.

Altă diferenţă dintre măsurătorile din cosmologie şi cele din restul fizicii este aceea că observatorul face mereu parte din sistemul pe care îl cercetează, universul. (în alte ramuri ale fizicii, observatorul e separat de sistemul preparat şi măsurat.) în combinaţie cu fizica cuantică, acest fapt conduce la dificultăţi în înţelegerea teoriei şi la paradoxuri aparente. Vom reveni la aceste probleme în capitolul 9, dedicat unicităţii soluţiilor cosmologice.

Triada cosmologiei observaţionale:
Un triumvirat puternic

Descoperirile privind structura la scară mare a universului şi expansiunea lui se întemeiază acum pe trei tipuri de observaţii:

(i) măsurători ale radiaţiei cosmice de fond, despre care am vorbit deja;

(ii) cartografieri ale materiei la scara mare a galaxiilor;

(iii) determinări precise ale distanţelor la care se află stelele care explodează violent, numite supernove de tip Ia, şi ale vitezelor lor.

În plus, există date privind dezintegrarea materiei, în special legate de abundenţele relative ale elementelor uşoare cum sunt hidrogenul şi heliul, care ne oferă informaţii despre o fază timpurie a universului numită *nucleosinteză.*

Fondul cosmic de microunde:
Distribuţii cereşti

Te-aş fi pictat; nu pe un zid stingher,
ci dintr-o margine în cealaltă de cer

Rilke, *Ceaslovul*[54]

Radiaţia electromagnetică emisă odinioară sub formă de lumină a călătorit prin spaţiu începând cu un moment aflat la mai puţin de jumătate de milion de ani după big bang[55] o perioadă timpurie în raport cu vârsta universului, care e puţin mai mica de 14 miliarde de ani. Radiaţia e palidă, dar pot fi măsurate detalii fine ale ei, de pildă distribuţia intensităţii pe întinsul cerului. După cum am mai arătat, această radiaţie îşi are originea în universul fierbinte de după big bang, şi a început să călătorească spre noi atunci când materia a devenit transparentă, la o temperatură de aproximativ 4000 de grade Celsius. La acel moment materia nu putuse încă să se concentreze în galaxii, în ciuda atracţiei gravitaţionale, pentru că presiunea radiaţiei în universul fierbinte ar fi pulverizat imediat orice agregare mai densă.

Deşi au fost emise în universul timpuriu, undele electromagnetice au supravieţuit sub forma radiaţiei de fond. Spre deosebire de radiaţia orientată a unei explozii singulare, cum e cea unei stele, care după ce ar ajunge la noi s-ar stinge treptat, radiaţia de fond persistă precum zgomotul într-o cameră aglomerată. Asemenea căldurii dintr-un balon cu aer fierbinte, ea pătrunde în tot spaţiul şi se diluează, răcindu-se astfel, pe măsură ce universul se dilată. Lungimea ei de undă este întinsă de spaţiul aflat în expansiune – din spectrul luminii vizibile trece în cel al microundelor fără să

dispară vreodată. Fondul se menţine şi ne oferă o perspectivă revelatoare asupra universului.

În universul foarte timpuriu distribuţia materiei şi a radiaţiei era aproximativ omogenă: aproape aceeaşi pretutindeni. Existau totuşi infime fluctuaţii, germenii a ceea ce mai târziu, după ce presiunea radiaţiei a scăzut, aveau să fie regiuni mult mai dense, devenind în cele din urmă galaxii. Urme ale acestor mici neomogenităţi pot fi încă detectate în distribuţia direcţiilor din radiaţia cosmică de fond: intensitatea ei variază uşor de la o regiune la alta a cerului. Asemenea variaţii pot fi calculate pe baza modelelor teoretice ale evoluţiei universului după big bang şi pot fi comparate cu datele măsurate pentru a oferi informaţii privind validitatea teoriei.

Încă din 1948 Ralph Alpher şi Robert Herman au prezis existenţa radiaţiei cosmice de fond şi au estimat, cu o precizie surprinzătoare, că temperatura era de 5 grade Kelvin, adică 268 grade Celsius. La această temperatură scăzută, majoritatea fizicienilor credeau că radiaţia nu poate fi detectată, aşa încât predicţia n-a prea fost luată în serios. Abia în 1965 radiaţia cosmică de fond a fost descoperită întâmplător de Amo Penzias şi Robert Wilson, ca urmare a perfecţionării detectorilor.[56] Penzias şi Wilson au primit Premiul Nobel în 1978 (împreună cu Piotr Kapiţa, pentru contribuţiile sale în fizica temperaturilor scăzute).[57]

Precizia limitată a măsurătorilor de la acea vreme a făcut ca radiaţia de fond să pară că e omogen distribuită pe întinsul cerului. Distribuţia intensităţii după frecvenţe se conforma, aşa cum era de aşteptat, formulei lui Planck pentru radiaţia corpului negru, cu care ne-am întâlnit deja atunci când am vorbit despre mecanica cuantică. De fapt, universul însuşi poate fi considerat ca o cutie perfect închisă: nimic nu se află în afara lui. În prezent, fondul de microunde este exemplul

experimental cel mai fidel de radiaţie a corpului negru. Din moment ce distribuţia depinde de temperatura radiaţiei, pe baza ei putem determina temperatura medie a universului în acea perioadă, iar rezultatul este 2,7 grade Kelvin, aproximativ -270 grade Celsius, valoare destul de apropiată de cea prezisă de Alpher şi Herman. Pare o temperatură foarte de scăzută, dacă ţinem cont că radiaţia provine din universul timpuriu fierbinte, când temperatura era de 4000 de grade Celsius, dar ea s-a răcit în cursul expansiunii ulterioare a universului.

În 1992, satelitul COBE (Cosmic Background Explorer – Exploratorul Fondului Cosmic – lansat în 1989) a făcut noi măsurători şi a pus pentru prima oară în evidenţă neregularităţile din distribuţia după direcţii a radiaţiei cosmice de fond, altfel spus anizotropia ei. Variaţiile sunt foarte mici, aproximativ o milionime din intensitatea totală, şi totuşi sunt măsurabile. Pentru această descoperire, împreună cu confirmarea formulei lui Planck pentru radiaţia de fond, principalii cercetători implicaţi în experiment, John Mather şi George Smoot, au primit în 2006 Premiul Nobel pentru fizică. Între timp au fost efectuate numeroase alte experimente, la început în Antarctica, folosindu-se baloane. În prezent, sateliţi precum WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe – Sonda Wilkinson pentru Anizotropia Microundelor) ne furnizează date spectaculoase. Un nou satelit, numit Planck şi pregătit de Agenţia Spaţială Europeană (ESA), a fost lansat în mai 2009 şi urmează să colecteze dale şi mai precise.

Anizotropiile în distribuţia pe cer a radiaţiei de microunde conţin o mulţime de informaţii privind fizica universului timpuriu. Ele arată felul în care atracţia gravitaţională a făcut să crească regiuni puţin mai dense decât media, în intervalul dintre faza cea mai fierbinte a big bang-ului şi momentul

în care radiaţia a fost eliberată într-un univers suficient de răcit. În comparaţie cu timpul scurs de-atunci, intervalul e mic. Nu prea existau „cocoloaşe”, aşa încât variaţiile de densitate şi anizotropiile din radiaţia rămasă sunt infime, dar nenule, ceea ce permite testarea modelelor teoretice. Folosind ecuaţiile lui Einstein, care ne spun cum se comportă materia într-un univers în expansiune, putem pomi de la valorile măsurate pentru a determina distribuţia materiei la momente anterioare. Rezultatul poate fi comparat cu modelele teoretice, permiţând predicţii privind felul în care era distribuită materia în faza extrem de fierbinte a big bang-ului – aproape de domeniul gravitaţiei cuantice.

Toate acestea presupun extrapolări şi au un caracter indirect, ceea ce împiedică cristalizarea unui model teoretic unic. Datele sunt totuşi suficient de precise pentru ca unele idei să fie respinse, iar altele confirmate. În strâns acord cu observaţiile este o clasă vâslă de modele care au în comun noţiunea de „inflaţie”. Ele susţin că universul s-a extins extrem de rapid pentru o perioadă de timp din faza foarte fierbinte, expansiunea fiind chiar accelerată. (După cum am mai spus, universul a intrat relativ recent într-o altă fază accelerată, care însă n-are legătură cu accelerarea inflaţionară.) Expansiunea accelerată a spaţiului, provocată de o aparentă forţă de respingere între toate masele din univers, pare să intre în contradicţie cu natura atractivă a gravitaţiei, deci mecanismul fizic care a provocat inflaţia rămâne încă un subiect de dezbatere. Vom reveni pentru a analiza mai în amănunt această problemă.

Alte detalii ale anizotropiilor oferă informaţii privind anumiţi parametri importanţi ce caracterizează cosmosul. De pildă spectrul anizotropiei – obţinut considerând distribuţia de intensitate de pe întinsul cerului ca pe suma unor

oscilaţii uniforme individuale – are în mod evident o contribuţie dominantă. Lungimea ei de undă e o măsură a curburii spaţiului la un moment dat. Spaţiul-timp şi spaţiul ca atare nu sunt neapărat plate, ci pot fi curbate precum o sferă. În acest caz, spunem că spaţiul are o curbură pozitivă. Spaţiul plat are o curbură nulă, iar un spaţiu care seamănă cu o şa, are o curbură negativă.

În relativitatea generală, curbura provoacă ceea ce percepem drept forţă gravitaţională, acţionând şi asupra luminii sau radiaţiei cosmice de fond de microunde prin curbarea razelor. În funcţie de curbură, radiaţia care călătoreşte spre noi din momentul emiterii ei e influenţată diferit de spaţiul pe care îl străbate; ea poate fi focalizată sau defocalizată. Când privim cerul, curbura pozitivă acţionează ca o lentilă asupra radiaţiei de microunde, mărind variaţiile de intensitate şi deplasând lungimea de undă a variaţiei de intensitate dominante. Din măsurarea lungimii de undă deducem că valoarea curburii ar trebui să fie aproximativ zero: la scară mare, spaţiul în care trăim este aproape plat. (Aceasta se referă la curbura spaţiului ca atare, acea parte din spaţiu-timp. Spaţiul-timp privit ca un întreg e curbat de materia pe care o conţine; doar un spaţiu-timp gol ar fi un spaţiu perfect plat. Universul actual este spaţial curbat la scări mai mici, datorită prezenţei corpurilor masive şi a puternicei lor forţe gravitaţionale; numai la scări spaţiale mari spaţiul este în medie plat.)

Din analiza altor maximumuri în afară de cel principal din spectrul de anizotropie – maximumuri prezise încă din 1965 de fizicianul şi activistul pentru drepturile omului Andrei Saharov pot fi deduse noi proprietăţi. E interesant de aflat cantitatea totală de materie care a condus la apariţia acelor „cocoloaşe” prin aglomerare gravitaţională. În sine, acest parametru nu înseamnă foarte mult, dar e important în

comparaţie cu cantitatea de materie căreia, conform relativităţii generale, îi corespunde un spaţiu aproape plat. În mod straniu, valoarea cantităţii de materie e mult mai mică decât este de aşteptat pentru un spaţiu plat, deşt putem deduce din poziţia maximumului principal că spaţiul e plat.

Datele oferite de maximumurile din spectrul de anizotropie par aşadar contradictorii – dacă nu cumva există o altă formă de energie, încă necunoscută, care nu conduce la aglomerare ele ar fi relevante pentru curbura spaţială, deci pentru maximumul principal, dar nu şi pentru cele mai mici. Nepotrivirea în interpretarea datelor pare o gravă problemă ce poate fi rezolvată doar postulând existenţa unei noi forme de energie, nedetectată până acum. Mai mult, observaţiile impun ca această formă de energie să constituie aproximativ 70% din energia totală a universului! Ca să postulezi existenţa unei noi forme de energie, mai ales a uneia dominante, trebuie să ai motive întemeiate, altminteri nu poţi fi luat în serios. Cosmologia a oferit deja un ansamblu solid de argumente, bazate pe faptul că noua formă de energie e impusă nu doar de datele privind fondul de microunde, dar şi de alte observaţii despre care vom vorbi în continuare. Ce rămâne un mister este natura acestei energii numite „energie întunecată”.

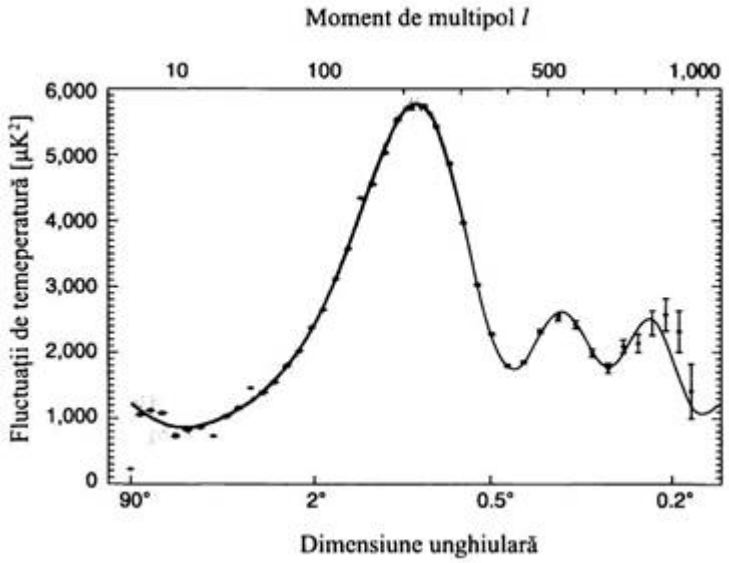


Figura 18. *Spectrul radiaţiei cosmice de microunde, cu un maximum principal şi altele mai mici. (Imagine obţinută prin amabilitatea NASA/WMAP Science Team, http://map.gsfc.nasa.gov/media/080999/index.html.)*

Pentru ca lucrurile să stea şi mai rău, valoarea întregii mase care nu e atribuită energiei întunecate este mai mare decât cantitatea de materie ce se găseşte sub forma stelelor. După scenariul deja cunoscut, aceasta conduce la postularea unei alte forme de energie: „materia întunecată”, diferită de energia întunecată. Este şi ea destul de răspândită, reprezentând 26% din energia universului, dar, spre deosebire de energia întunecată, nu provoacă accelerarea expansiunii. Pentru materia pe care o cunoaştem, şi din care suntem alcătuiţi, nu rămân decât 4 procente. De multă vreme existau indicii privind materia întunecată, deduse din vitezele stelelor în galaxii. Este prin urmare încurajator să vezi că diferite tipuri de observaţii cosmologice conduc la rezultate convergente. Despre materia întunecată nu vom vorbi aici, fiindcă nu prea se leagă de gravitaţia cuantică. Drept candidaţi pentru materia întunecată au fost propuse găurile negre, precum şi noi tipuri de particule elementare, care, dacă există, ar putea fi găsite în experimentele din acceleratoarele de particule.

Altă caracteristică interesantă a radiaţiei de fond este polarizarea ei. Undele electromagnetice sunt transversale, ca o frânghie care poate oscila în diferite direcţii spaţiale perpendiculare pe axa ei. Şi pentru radiaţia cosmică de microunde poate fi determinat planul în care are loc această oscilaţie, precum şi variaţia lui pe cer. Măsurători recente efectuate prin satelitul WMAP au arătat că polarizarea există şi au oferit primele valori concrete, chiar dacă nu foarte precise. Noile date provenind de la satelitul Planck urmează să aducă informaţii suplimentare despre radiaţia de fond. Polarizarea poate fi provocată doar de deformări spaţio-temporale periodice ale undelor gravitaţionale, alungiri ale scenei pe care se deplasează microundele, dar nu şi de alte curbări spaţio-temporale, aşa cum sunt ele produse de materie. Din datele privind polarizarea putem trage concluzii despre intensitatea undelor gravitaţionale în apropierea big bang-ului, pentru a ne testa apoi ideile teoretice, cum ar fi cele legate de gravitaţia cuantică.

Cartografierea galaxiilor:
Milioane şi milioane de Căi-Lactee

Întâi la mărunţişuri te aplici,
Zorindu-te să-nghiţi pe cei mai mici.
Crescând apoi încet, din treaptă-n treaptă
Te vei forma spre cea mai naltă faptă.

Goethe, *Faust*[58]

La un timp după emiterea fondului cosmic de microunde s-au format galaxii din acele variaţii de densitate ai căror germeni pot fi recunoscuţi în uşoarele neuniformităţi ale radiaţiei de fond. Neregularităţile iniţiale în distribuţia materiei erau mici, dar existau într-adevăr regiuni mai dense. Exercitând o atracţie gravitaţională mai puternică asupra materiei din jur, ele au aglutinat şi mai multă materie. Uneori, centre de densitate învecinate s-au apropiat şi s-au contopit, cele mai masive şi lacome înghiţind aproape totul din jurul lor, în timp, centrele au înghiţit tot mai mult. Masa lor a sporit, au devenit mai dense, presiunea şi temperatura lor au crescut, pentru ca în cele din urmă în ele să se aprindă stele. Aceste acumulări au dus la apariţia galaxiilor, în timp ce regiunile intergalactice sărăcite au rămas lipsite de materie.

Din moment ce ecuaţiile lui Einstein ne permit să calculăm aglomerarea materiei, pornind de la o configuraţie iniţială, aşa cum o putem deduce din radiaţia de fond, cartografierea precisă a galaxiilor ne oferă încă un test al teoriei. Asemenea cartografieri la scară mare au devenit posibile cu ajutorul telescoapelor tot mai sensibile, care detectează chiar şi galaxiile îndepărtate şi poziţiile lor. Deşi hărţile existente rămân incomplete, imaginile rezultate, în special cele din Sloan

Digital Sky Survey (SDSS), sunt impresionante (vezi figura 19). SDSS include milioane de galaxii din vecinătatea noastră cosmică, arătând cât de omogen este distribuită materia în univers. Prin comparaţie, ceea ce vedem cu ochiul liber pe cer este doar un detaliu neînsemnat – un eveniment istoric accidental în dezvoltarea universului şi a propriei noastre existenţe.

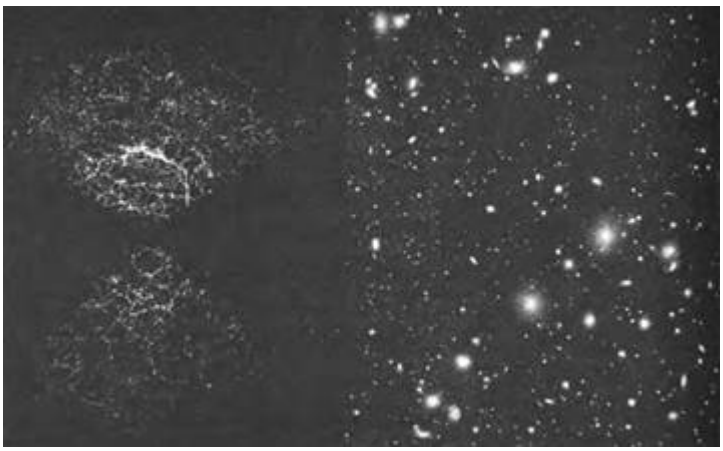


Figura 19. *Hartă galactică din SDSS. La scară mare, universul arată mult mai omogen decât ne indică vecinătatea sistemului nostru solar şi Calea-Lactee. (http://www.sdss.org/news/releases/galaxies.jpg)*

Această omogenitate la scară mare se dovedeşte a fi o imensă şansă pentru cosmologie, căci un asemenea grad înalt de simetrie aduce cu sine mari simplificări în rezolvarea ecuaţiilor lui Einstein. Altminteri, în pofida tuturor observaţiilor, n-am putea vedea pădurea cosmică din cauza copacilor galactici în complicata lor evoluţie. Pentru a concepe un model ai universului ar fi trebuit luate în considerare atât de multe detalii, încât n-am fi putut ajunge la explicaţii satisfăcătoare. Din fericire, universul vine în ajutorul nostru (sau poate că ne induce în eroare?[59]).

În afară de această confirmare a omogenităţii, presupusă de multă vreme de cosmologi, hărţile galactice oferă date concrete în sprijinul concluziilor deduse din radiaţia cosmică de fond.

În ciuda puternicei omogenităţi la scară mare, distribuţia galaxiilor prezintă mici variaţii la diferite scări. La fel ca în cazul fondului de microunde, vedem un maximum clar pentru o anumită distanţă dintre galaxii: e mult mai probabil să găsim o pereche de galaxii separate de acea distanţă decât de altele, observaţie comunicată simultan în 2005 de SDSS şi 2dFGRS (Two Degree Field Galaxy Redshift Survey). Ecuaţiile lui Einstein fac legătura dintre această distanţă şi curbura spaţiului, indicând iarăşi faptul că spaţiul este plat.

Asemenea concordanţe între măsurători diferite, demonstrând coerenţa datelor, constituie un indiciu că ne aflăm pe drumul cel bun în înţelegerea universului. Mai mult, în acest caz ele arată că, la o scară mare a timpului, curbura rămâne constantă. Minusculele fluctuaţii ale densităţii din momentul emisiei fondului de microunde, pe de-o parte, şi distribuţia din hărţile galactice, pe de alta, sunt separate prin milioane de ani. În tot acest timp, curbura spaţiului trebuie să fi rămas neschimbată – ceea ce coincide cu predicţia relativităţii generale pentru un univers cu o distribuţie de masă aproape omogenă. Teoria a trecut deci cu succes încă un test.

Supernovele:
Ultimele cuvinte înţelepte ale stelelor muribunde

După ce s-au format primele galaxii, stelele lor au continuat să evolueze. La un moment dat, cele care trăiau într-un ritm mai rapid şi-au consumat combustibilul nuclear; temperaturile şi presiunile nu mai erau suficient de ridicate ca să împiedice colapsul gravitaţional. Unele dintre ele erau condamnate să sfârşească devenind găuri negre.

De găurile negre ne vom ocupa în capitolul următor, ceea ce ne interesează aici e faptul că nu toată materia stelară e prinsă în acest colaps – o parte importantă e ejectată în spaţiu. Energia eliberată apare sub forma unei uriaşe explozii numite *supernovă.* O categorie de supernove, cele de „tip Ia", au o proprietate interesantă: observarea culorilor luminii emise, de pildă prin descompunerea ei cu o prismă, permite determinarea cantităţii totale de energie ejectate. De aici putem deduce distanţa până la supernovă, bazându-ne pe faptul că explozia apare cu atât mai strălucitoare cu cât e mai apropiată şi cu cât energia emisă e mai mare. Din moment ce putem măsura direct strălucirea şi determina strălucirea totală din distribuţia culorilor, distanţa poate fi dedusă. Pentru stelele normale, fără să ştim cât de strălucitoare e arderea lor, acest lucru nu e cu putinţă. Distanţele până la ele pot fi determinate indirect, de pildă prin compararea cu alte obiecte din vecinătate cum sunt aceste supernove. De aceea supernovele sunt considerate etaloane, un fel de faruri care îi călăuzesc pe astronomi în explorarea universului.

Supernovele strălucesc intens din cauza violenţei evenimentelor care se petrec în ele, ceea ce le face să fie vizibile de la mari distanţe. Datorită vitezei finite a luminii, ele ne oferă informaţii din trecutul îndepărtat, din momentul în care lumina lor şi-a început călătoria spre noi. Istoria expansiunii universului poate fi urmărită determinând nu numai distanţa până la supernove, dar şi viteza lor provocată de expansiunea universului, folosind din nou culorile din lumina lor. (Viteza lor e influenţată şi de atracţia gravitaţională a maselor din vecinătate. Supernovele se află în galaxii, la fel ca stelele din care provin, ele se rotesc în jurul unui centru, iar această mişcare se suprapune peste cea legată de expansiunea universului. Asemenea contribuţii sunt însă mici, în plus sunt distribuite aleatoriu, aşa încât nu joacă vreun rol atunci când luăm în considerare un ansamblu vast de supernove.)

Distanţa ne spune cu cât timp în urmă a explodat supernova; distribuţia culorilor, rata expansiunii din acel moment. De aici rezultă o relaţie; rata de expansiune în funcţie de timp, aşa cum poate fi ea dedusă rezolvând ecuaţiile lui Einstein pentru o compoziţie energetică a universului dată. Comparând o clasă vastă de soluţii cu acea parte a relaţiei expansiune-timp observată, putem vedea ce compoziţie se potriveşte cel mai bine cu trecutul recent al universului. Aceasta constituie o altă metodă de a determina parametrii cosmologici, independentă de acele măsurători despre care am vorbit în precedentele două secţiuni, în acest caz sunt observate stele individuale, nu galaxii întregi sau radiaţia de microunde de pe firmament. Supernovele permit doar determinarea trecutului celui mai recent din istoria universului. Fondul de microunde, hărţile galaxiilor şi supernovele se raportează la perioade foarte diferite. Datele

obţinute pe aceste căi fiind independente, coerenţa lor poate fi astfel testată.

Coerenţa e într-adevăr confirmată şi dezvăluie o surpriză. Am văzut că detaliile distribuţiei intensităţii radiaţiei de microunde pe firmament pot fi explicate doar prin contribuţia misterioasei energii întunecate. În perioada din urmă, această contribuţie implică accelerarea expansiunii cosmice. Trecutul recent este tocmai domeniul observaţiilor legate de supernove, iar ele pun în evidenţă această accelerare. Această formă de energie trebuie deci luată în considerare, chiar dacă deocamdată lipsesc explicaţiile teoretice pentru ea.

Postularea existenţei unor noi forme de materie pentru a explica date altminteri ireconciliabile este un act de curaj, dar această situaţie nu e nouă în fizică. În 1930, de pildă, Wolfang Pauli a legat pierderea de energie din anumite dezintegrări radioactive de existenţa unei particule necunoscute la acea vreme. Se presupunea că particula interacţionează slab, aşa încât prezenţa ei nu era detectată prin măsurători directe, ci doar prin energia pe care o prelua. Lucrurile se potriveau – o nouă particulă şi un mecanism care făcea să nu fie observabilă, însă nici măcar Pauli nu era încântat de soluţia asta; deşi pierderea de energie a fost confirmată prin măsurători mai precise, el considera că trebuia apelat la această explicaţie doar în ultimă instanţă, pentru a nu fi violată legea conservării energiei, care joacă un rol fundamental în fizică. Pauli a avut totuşi dreptate; particula a fost în cele din urmă detectată de Frederick Reines şi Clyde Cowan în 1965; pentru această descoperire Reines a primit în 1995 Premiul Nobel (Cowan murise în 1974). În ciuda faptului că interacţiile erau slabe, detectarea lor a fost posibilă graţie sursei puternice a unui reactor nuclear[60]; existând suficient de multe asemenea particule greu sesizabile, nu toate scapă observaţiei. Ne-am

mai întâlnit deja cu această particulă: este neutrinul, al cărui nume a fost dat de Enrico Fermi în 1934. Neutrinul joacă un rol important în astrofizica şi cosmologia modernă.

Presiunea negativă:
Respingerea greu sesizabilă

Va dobândi oare cosmologia un succes asemănător: va obţine o dovadă directă şi indiscutabilă privind forma misterioasă de energie a cărei existenţă o presupune? Înainte ca acest obiectiv să fie atins, teoreticienii trebuie să caute explicaţii posibile în grădina zoologică a fizicii particulelor sau în menajeria fenomenelor gravitaţionale. Fără asemenea indicii, o cercetare experimentală ar semăna cu căutarea acului în carul cu fân. În ultimul timp au fost propuşi numeroşi candidaţi exotici ca posibile surse ale presiunii negative. Natura unora dintre ei ne va conduce spre gravitaţia cuantică.

Energia întunecată:
Cele 70 de procente necunoscute

Naturii îi place să rămână ascunsă.

Heraclit „Obscurul”, fragment

Chiar şi teoriile cele mai excentrice au dificultăţi mari în tratarea energiei întunecate, ale cărei proprietăţi sunt cu totul ieşite din comun. Această formă de energie trebuie să provoace expansiunea accelerată, deci trebuie să aibă un efect de respingere nu doar asupra materiei, ci şi asupra spaţiului şi timpului. Acest comportament nu este de aşteptat pentru materia supusă gravitaţiei, care în mod normal face ca distribuţiile de masă şi energie să se atragă reciproc – ducând, de pildă, la grava problemă a singularităţii care apare în colapsul nestăvilit.

Gravitaţia cuantică poate conduce la forţe repulsive, dar ea devine semnificativă doar la scara lungimii Planck, acolo unde energia are un comportament straniu. În cazul energiei întunecate însă, respingerea apare la scara uriaşă a întregului univers din prezent, aşa încât e greu de conceput o explicaţie pe baza gravitaţiei cuantice. Efectele infime ale gravitaţiei cuantice din regiuni minuscule ar trebui cumva să se însumeze pentru a rezulta comportamentul observat. Suntem încă departe de a putea face calcule concrete, ca să nu mai vorbim de detectarea directă a acestei noi forme de energie.

O altă soluţie posibilă este aceea de a pune sub semnul întrebării anumite presupuneri cosmologice. În evaluarea datelor, presupunem în chip firesc că putem folosi un model omogen spaţial, cu o densitate pretutindeni uniformă, iar hărţile galactice arată că această presupunere este

într-adevăr rezonabilă. Expansiunea accelerată a început însă relativ recent, după ce universul se afla în acea fază care apare în majoritatea hărţilor galactice, fi oare cu putinţă ca acceleraţia gravitaţională, care între timp a acţionat necontenit, să fi îngrămădit materia aşa încât presupunerea privind omogenitatea să nu mai fie valabilă?

Această idee, urmată mai cu seamă de Thomas Buchert, are avantajul că nu pune sub semnul întrebării relativitatea generală. Expansiunea accelerată ar fi doar aparentă – ar fi rezultatul artificial al încorsetării unui univers deja puternic neomogen în forma matematică a unei soluţii omogene. Simplificările în calculele teoretice întemeiate pe presupunerea omogenităţii ar trebui şi ele abandonate. Asemenea dubii sunt justificate, fiindcă predicţiile care se bazează doar pe existenţa unor soluţii matematice simple nu sunt niciodată valide. Simplitatea este tentantă numai pentru minţile noastre limitate, care au idei preconcepute, nu şi pentru natură. Soluţiile cu o formă suficient de simplă pot fi analizate în toate detaliile, dar preţul plătit este ignorarea unor proprietăţi care pot fi importante. Numai în cadrul general în care e folosită teoria ne putem da seama dacă un model e demn de încredere în toate privinţele; în relativitatea generală, ecuaţiile pot deveni atât de complexe, încât comportamentul soluţiilor e greu de determinat. Aşadar, din păcate, această propunere n-a reuşit deocamdată să ofere explicaţii întru totul convingătoare pentru energia întunecată.

Este poate o consolare să aflăm că expansiunea accelerată în anumite faze e cel puţin posibilă, deşi nu în chip firesc, în cadrul relativităţii generale, în ciuda caracterului atractiv al gravitaţiei. În teoria newtoniană, doar masa pune în funcţiune gravitaţia, care e pur atractivă. În relativitatea generală însă, gravitaţia nu e provocată doar de

mase, ci şi de energie, care, conform relativităţii speciale, e echivalentă cu masa, prin celebra formulă a lui Einstein, precum şi cu presiunea. Aşa cum se întâmplă cu majoritatea diferenţelor între gravitaţia newtoniană şi cea einsteiniană, rolul presiunii e o consecinţă a transformabilităţii spaţiului şi timpului. Relevantă pentru gravitaţie e în primul rând densitatea de energie: o anumită cantitate de energie localizată într-un anumit volum. Din moment ce masa e echivalentă cu energia, rezultatul calitativ e aceeaşi atracţie a maselor ca în fizica newtoniană. Dar relativistic, prin schimbarea stării de mişcare, spaţiul poate fi transformat în intervale de timp. Aşa cum spaţiul şi timpul nu pot fi privite independent, ci formează un obiect unic – spaţiul-timp nici densitatea de energie nu poate fi considerată un obiect independent; în definiţia ei sunt folosite intervalele de lungime. După schimbarea stării de mişcare şi transformarea parţială a spaţiului în timp, densitatea de energie aparent statică ia forma uni flux de energic: ceea ce pentru un observator este energie localizată într-o regiune, pentru un altul, aflat în mişcare faţă de primul, este energie deplasându-se într-o anumită direcţie.

Obiectul matematic care descrie densitatea de energie e uşor diferit de obiectul care dă direcţiile din spaţiu-timp. Direcţiile din spaţiu-timp se numesc *vectori* şi au patru componente, după cele patru dimensiuni ale spaţiului-timp. Densitatea de energie şi fluxul de energie – acesta din urmă cu trei componente, datorită direcţiei lui în spaţiu – reprezintă patru cantităţi, de ajuns pentru a alcătui un vector. Numai că obiectul matematic care descrie energia nu e un vector, ci un *tensor* – aşa-numitul tensor impuls-energie. Într-un spaţiu cvadridimensional, un asemenea tensor nu are patru componente, ci şaisprezece – l-am putea privi ca pe un vector la pătrat sau ca pe o matrice.

Celelalte componente ale tensorului impuls-energie sunt tensiunile elastice din materie şi presiunea. Presiunea se defineşte ca variaţia de energie (cu semnul minus) împărţită la variaţia volumului care înconjoară acea cantitate de energie. Definiţia ilustrează comportamentul materiei supuse unei presiuni. Dacă încercăm să comprimăm volumul, trebuie să acţionăm împotriva presiunii, crescând astfel energia materiei dinăuntru. Variaţia volumului e negativă, variaţia energiei e pozitivă. Cu cât cheltuim mai multă energie, cu atât presiunea creşte. Dar dacă, cu aceeaşi cantitate de energic, volumul creşte, atunci presiunea scade. De aici decurg proporţionalitatea directă a presiunii cu energia folosită şi proporţionalitatea ei inversă cu variaţia volumului. Din moment ce valorile energiei şi variaţiile de lungime joacă şi ele un rol aici, este de înţeles că presiunea trebuie combinată cu densitatea de energie şi fluxul de energie pentru a alcătui un singur obiect matematic.

În fizica newtoniană, densitatea de masă se află la originea forţelor gravitaţionale. În descrierea relativistă, nu putem separa densitatea de energie de fluxul de energie sau de presiunea şi tensiunile interne. Forţa gravitaţională trebuie deci să fie o consecinţă a întregului tensor impuls-energie, şi într-adevăr aşa apare în ecuaţiile lui Einstein. Presiunea este deci relevantă pentru expansiunea universului; presiunea, şi nu doar densitatea, întregii materii conţinute în univers contribuie la istoria expansiunii sale. Consecinţele în privinţa unei expansiuni accelerate sunt imediate: la fel ca masa, densitatea de energie trebuie să fie pozitivă, şi nu poate juca un rol direct în generarea forţelor repulsive. Dimpotrivă, presiunea, deşi deseori pozitivă, poate lua valori negative şi genera astfel o gravitaţie repulsivă, cu condiţia să fie suficient de puternică pentru a contrabalansa densitatea de energie pozitivă. Iată deci una dintre proprietăţile

fundamentale ale energiei întunecate: o puternică presiuni negativă, cu energie pozitivă.

Presiunea negativă poate apărea în anumite condiţii, de pildă în tuburile capilare ale copacilor, prin evaporarea apei din vârfurile frunzelor. Dar ce rol joacă în gravitaţie? Presiunea se defineşte ca variaţia energiei corespunzând unei variaţii a volumului, cu un semn minus introdus convenţional pentru ca, în situaţii obişnuite, să ia valori pozitive. În acest caz, energia scade atunci când volumul creşte, iar, de pildă, un gaz se vu dilata pentru a-şi coborî energia. Pentru a împiedica acest lucru, gazul trebuie închis într-o incintă cu pereţi suficient de rezistenţi în cazul presiunii negative, energia materiei scade atunci când aceasta se contractă, ceea ce poate fi împiedicat doar printr-o atracţie.

Acesta e rolul presiunii atâta timp cât ignorăm gravitaţia Pentru materia presurizată din univers, vedem din nou trăsăturii tipică a gravitaţiei clasice, cea care ne-a condus spre singularităţi în cazul colapsului gravitaţional. Din comprimarea maselor datorată gravitaţiei atractive rezultă o imensă aglomerare, pentru ca atracţia gravitaţională să devină şi mai intensă, în relativitatea generală nu există scăpare din această situaţie instabilă: după un timp, gravitaţia autodistructivă sfârşeşte într-o singularitate, dacă nu cumva poate fi îmblânzită de forţele repulsive ale gravitaţiei cuantice.

Presiunea gravitaţională are un comportament instabil asemănător. În cazul unui univers omogen, materia este „închisă” nu într-o incintă, ci în întregul spaţiu al universului. Cu o presiune pozitivă, materia trebuie să se extindă, ceea ce e posibil mimai prin expansiunea întregului univers. Dar presiunea pozitivă, ca şi energia pozitivă, implică atracţia gravitaţională, iar expansiunea cosmică este încetinită. Tendinţa de expansiune sub presiune pozitivă e contracarată de gravitaţie. Dacă, sub presiune pozitivă, materia e localizată

într-o zonă a spaţiului-timp cum ar fi o stea care şi-a epuizat combustibilul, colapsarea e accelerată, pentru ca această situaţie instabilă să conducă în cele din urmă la singularitatea unei găuri negre.

În cazul presiunii negative, situaţia se inversează, presupunând că aceasta poate compensa densitatea de energie pozitivă. Materia din univers ar trebui atunci să se contracte, ceea ce, pentru o distribuţie omogenă a materiei în întregul cosmos, nu e cu putinţă decât odată cu contractarea universului. Gravitaţia reacţionează în sens contrar prin amplificarea expansiunii cosmice, de unde rezultă extinderea accelerată. După cum indică observaţiile, expansiunea universului în trecutul recent a fost într-adevăr accelerată. Dacă presupunerea privind omogeneitatea e întemeiată, trebuie să ne aşteptăm la o imensă presiune negativă produsă de materie.

Deşi scenariul de mai sus e coerent în teorie, el e departe de a constitui o explicaţie. Pentru a obţine din calcule o presiune negativă suficientă care să acţioneze de-a lungul duratelor cosmice, trebuie apelat din plin la arsenalul fizicii teoretice. Presiunea negativă e posibilă, însă nu numai că trebuie să fie suficient de puternică pentru a compensa densitatea de energie pozitivă a întregii materii din univers, ci trebuie şi să predomine la scara de timp cosmologică. Nu cunoaştem deocamdată vreun fenomen care să explice acest comportament, iar propunerile teoretice actuale rămân neconvingătoare. Ideea de a explica accelerarea cosmică prin noi forme de materie pare o soluţie de avarie la care apelezi doar în ultimă instanţă. Pentru energia întunecată nu este de-ajuns să presupui existenţa unei noi particule şi să postulezi eventual anumite valori ale masei ei, ci trebuie să concepi detalii precise ale proprietăţilor ei – ceea ce complică mult problema energiei întunecate.

Inflaţia: Speculaţii privind universul timpuriu

Dacă presiunea negativă poate contracara gravitaţia pur atractivă, nu ar putea ea juca un rol important în eliminarea singularităţilor? În acest caz, spre deosebire de cel al energiei întunecate, materia supusă presiunii negative trebuie să fie distribuită nu în vastul univers din prezent, ci în infimul univers timpuriu din primele momente de după big bang. Observarea radiaţiei cosmice de fond ne îndreptăţeşte să credem în ipoteza unui univers timpuriu omogen. Cum densităţile şi temperaturile erau mult mai mari decât în prezent, teoria cuantică a jucat pesemne un rol important.

Presiunea negativă din universul timpuriu poartă numele de inflaţie[61], ceea ce trimite la expansiunea inflaţionară (accelerată) a universului. Deşi este de bănuit că, derulând timpul în sens invers, presiunea negativă a inflaţiei se opune colapsului total al unui univers mic, aceasta nu e suficient de puternică. Ea acţionează ca un fel de forţă repulsivă, dar, după cum au arătat (în anumite condiţii) cu câţiva ani în urmă Arvind Borde, Alan Guth şi Alex Vilenkin, apariţia singularităţii nu e împiedicată. Alan Guth este acela care a propus teoria inflaţiei cosmice în 1981, pentru considerente care n-au legătură cu problema singularităţii. (La acea vreme au apărut articole asemănătoare ale altor autori, care însă au trecut neobservate.)

Cercetările din teoria inflaţionară seamănă oarecum cu cele din gravitaţia cuantică: timp de decenii ele au rămas speculaţii călăuzite de principii şi de încercarea de a explica incoerenţe, fără a se baza pe date experimentale. Abia în

ultimii ani au apărut şi observaţii, iar anumite modele pot fi deja respinse. La o scară mai mică – eforturile n-au fost la fel de intense şi de insistente ca în cazul gravitaţiei cuantice, iar din punct de vedere matematic domeniul e mai puţin tentant ne dăm seama cât de fructuos poate fi un bun cadru teoretic, chiar dacă nu apelează la date experimentale. În mod uimitor, inflaţia poate explica felul în care a apărut tot ceea ce cunoaştem, inclusiv cum am apărut noi înşine, din fluctuaţiile cuantice ale unui univers iniţial gol.

Deşi n-a fost observată direct, inflaţia oferă un mecanism elegant pentru a explica şi alte observaţii privind distribuţia materiei în univers. Ea este unul dintre fenomenele cele mai energetice la care avem măcar un acces indirect, aşa încât poate fi un instrument extrem de util în sondarea gravitaţiei cuantice. În timpul inflaţiei, densităţile n-au fost la fel de mari ca densitatea Planck, dar, în scenariile tipice, ele s-au apropiat de cel puţin o milionime din această valoare corespunzând unor bilioane de sori comprimaţi până la dimensiunea unui proton. Există deci numeroase modele care combină diferitele abordări ale gravitaţiei cuantice cu inflaţia sau chiar deduc inflaţia ca o consecinţă a gravitaţiei cuantice.[62]

Teoria corzilor a oferit cea mai mare diversitate de scenarii din care să poată decurge o explicaţie a inflaţiei – ceea ce nu-i deloc banal, deoarece, drept consecinţă a principiilor ei de simetrie, teoria corzilor tratează mai curând densitatea de energie negativă cu presiune pozitivă decât densitatea de energie pozitivă cu presiune negativă. Odată înţelese aspecte ale teoriei corzilor legate de ce se întâmplă în dimensiunile suplimentare, cercetătorii au început să construiască configuraţii care să explice inflaţia universului. Renata Kallosh, Shamit Kachru, Andrei Linde şi Sandip Trivedi au construit asemenea modele, studiate apoi de mulţi alţii, însă din acestea n-au rezultat predicţii

suficient de restrictive privind inflaţia. În cosmologia cuantică cu bucle, orice efecte inflaţionare ar trebui să fie consecinţe ale proprietăţilor ei fundamentale – natura atomică a spaţiului şi timpului. Deşi numărul posibilităţilor e mai mic, nu e totuşi suficient de mic pentru a fi testate tranşant prin observaţii cosmologice. Vom reveni la aceste aspecte în capitolul de faţă şi în capitolul 8.

Comportamentul inflaţionar al universului timpuriu a fost studiat deocamdată mai ales în contextul cosmologiei tradiţionale, pentru a explica felul în care au apărut structurile la scară mare pe care le vedem azi. Pentru a înţelege rolul inflaţiei, trebuie să vedem mai întâi cum ar arăta cosmologia în absenţii episodului inflaţionar. Radiaţia cosmică de fond ne spune că materia din universul timpuriu nu era chiar perfect omogenă. Folosind ecuaţiile lui Einstein şi derulând filmul evoluţiei în sens invers, deducem că distribuţia materiei în univers era mai omogenă în trecut, lucru firesc, odată ce gravitaţia a dus, în timp, la aglomerare. Cu cât ne apropiem de big bang, cu atât universul e mai omogen, ceea ce ne arată că universul nostru complex putea să fi apărut dintr-o stare iniţială foarte simplă. Domnia atracţiei gravitaţionale asupra materiei într-un univers în expansiune a fost de-ajuns pentru a conduce la toate acele structuri complicate pe care le vedem acum, de la roiurile de galaxii până la sistemul nostru solar cu planetele lui. Existenţa unei stări iniţiale simple ne sugerează că într-o bună zi ani putea ajunge la o explicaţie ultimă prin care să răspundem În întrebările fundamentale: De ce lucrurile sunt aşa cum sunt şi, la urma urmei, pur şi simplu de ce sunt?

Din păcate însă, o stare foarte omogenă în universul timpuriu ar confrunta cosmologia cu o problemă delicată. Considerând că universul are ca început singularitatea big bang, există o durată

maximă finită pentru propagarea semnalelor între două puncte: dacă un semnal porneşte din momentul singularităţii (sau la scurt timp după aceea, fiindcă în chiar acel moment nici îi teorie nu e valabilă), el poate străbate doar o anumită distanţă până la un moment ulterior. Ţinând cont de valoarea vitezei luminii, distanţa maximă poate fi calculată în cadrul relativităţii generale, iar ea este atât de mică, încât, în condiţii normale, n-ar permite luminii din universul timpuriu să străbată întreg spaţiul. Aceasta este problema (problema orizontului): Cum a putut să apară o distribuţie omogenă, cu o densitatea pretutindeni egală, fără semnale care să regleze această omogenitate?

În acest punct intră în scenă inflaţia, deoarece „condiţiile normale" pomenite mai sus presupun o presiune pozitivă. Dacă însă presiunea a fost negativă un timp suficient de lung, Guth a observat că semnalele puteau circula între toate regiunile universului timpuriu. Expansiunea rapidă a spaţiului-timp ar fi dus cu sine toate semnalele, permiţându-le să străbată distanţe mult mai mari nu prin propria lor deplasare, ci lăsându-se antrenate de universul aflat în extindere accelerată. Nu apar probleme de coerenţă într-un univers inflaţionar, iar acesta e unul dintre avantajele teoriei inflaţiei.

Vedem deci că existenţa unei singularităţi big bang joacă un rol important aici, fiindcă e considerată punctul de pornire îi universului, însă, având în vedere că teoria se prăbuşeşte în acel punct, universul nu putea să fi început dintr-o singularitate. Într-o teorie rezonabilă, singularitatea e eliminată de mecanisme cum e cel al forţelor repulsive din gravitaţia cuantică. Problema orizontului este atunci automat rezolvată, într-un mod diferit de cel propus de Guth: dacă universul a existat înainte de big hang, semnalele au avut timp destul să lege între ele

toate regiunile din universul timpuriu, iar o distribuţie omogenă a putut fi obţinută cu uşurinţă.

Altfel, problema orizontului ar înceta să mai fie un motiv de a apela la inflaţie. Totuşi, inflaţia are un avantaj care n-a fost sesizat în consideraţiile iniţiale ale lui Guth. Din calcule amănunţite privind felul în care se propagă şi evoluează undele în spaţiu-timp – prin metode elaborate în 1981 de Slava Mukhanov şi G.V. Cbibisov, încă înainte de apariţia teoriei inflaţiei – rezultă că inflaţia conduce la un tip aparte de distribuţie, aproape perfect omogenă, Această formă de distribuţie este tocmai cea observată în prezent. Deşi expansiunea accelerată a universului timpuriu (spre deosebire de cea actuală, legată de energia întunecată) nu poate fi văzută direct, există dovezi indirecte convingătoare în favoarea inflaţiei, adică a unei presiuni negative în universul timpuriu.

Forţa explicativă a modelelor inflaţionare este încă şi mai mare. Nu numai că ele arată de ce materia este atât de omogenă, dar explică şi felul în care a apărut materia din faza big bang fierbinte, densă şi haotică: într-un univers care se extinde accelerat, sunt create în permanenţă particule de materie din vid din golul absolut! La fel ca în descrierea noastră anterioară în care funcţiile de undă se comportă ca valurile unui ocean care se îngrămădesc atunci când fundul oceanului se cutremură, funcţiile de undă ale materiei sunt excitate de etapa „tremurătoare” a unui spaţiu-timp accelerat. O stare de vid a materiei iniţial goală se umple tot mai mult cu particule de materie reală în cursul inflaţiei.

În cosmologie, aceasta înseamnă că nici măcar o stare de vid perfect la big bang nu rămâne goală în timpul inflaţiei, ci se îmbogăţeşte mereu cu materie. La o expansiune suficient de uniformă, cu o acceleraţie aproape constantă, distribuţia materiei devine automat aproape omogenă spre

sfârşitul inflaţiei, ceea ce e în acord cu măsurătorile radiaţiei cosmice de fond.

Acest proces de creare a materiei e posibil numai dacă includem gravitaţia în ecuaţie, altminteri ar intra în contradicţie cu conservarea energiei. Energia particulelor nou create trebuie să aibă o sursă, ea nu poate să apară din nimic. Presiunea negativă joacă şi ea un rol aici: în mod normal, atunci când forţa gravitaţională e slabă, materia supusă unei presiuni negative trebuie să devină mai densă; ea îşi poate scădea energia contractându-se, prin urmare va face asta pe cât îi este cu putinţă. În univers, materia e distribuită omogen şi nu e constrânsă de nimic, deci nimic n-o poate împiedica să se contracte. Dar gravitaţia nu respectă această tendinţă, şi reacţionează la presiunea negativă prin accelerarea expansiunii: dacă presiunea ar fi pozitivă, ne-am aştepta ca materia să se răsfire, însă, din moment ce presiunea contribuie la energie, ea provoacă atracţie gravitaţională. Presiunea negativă inversează efectele: ne aşteptăm la contracţie, dar, sub acţiunea gravitaţiei, expansiunea e amplificată. Gravitaţia face ca, în loc să scadă, energia materiei să crească. În felul acesta apar excitaţii ale materiei, adică particule, chiar dacă starea iniţială era de vid.

Iată cum are loc crearea de particule conform teoriei cuantice, singura care poate explica starea de vid a materiei. Ca orice altă stare, vidul de materie într-un univers în expansiune suferă fluctuaţii. Acest comportament fluctuant seamănă cu imprecizia în determinarea poziţiei unui electron. Funcţia de undă a materiei, în care numărul particulelor individuale joacă un rol comparabil cu cel al poziţiei din mecanica cuantică, e răsfirată şi nu i se poate asocia un număr precis de particule. Dacă universul nu s-ar extinde, n-ar apărea alte consecinţe; numărul de particule ar fi imprecis, dar zero în medie, şi aşa ar

rămâne pentru totdeauna. La fel ca în cazul forţelor efective din mecanica cuantică, expansiunea universului face însă ca fluctuaţiile să influenţeze numărul de particule, aşa cum e el determinat de funcţia de undă a materiei. În timp, apar noi excitaţii, iar numărul de particule nu e nul nici măcar în medie.

Noţiunea de perechi de particule ne poate fi de folos aici. La fel ca numărul particulelor în vid, şi energia e imprecisă, permiţând existenţa pentru scurt timp a unor perechi de particule de materie şi antimaterie, cum sunt electronul şi pozitronul. În condiţii normale, partenerii unei asemenea perechi s-ar anihila reciproc imediat producând radiaţie, dar acest lucru poate fi împiedicat dacă cele două particule se îndepărtează una de alta suficient de repede. Evident, nu poţi manevra particulele direct ţinându-ie la distanţă, dar, dacă ele sunt încărcate electric, sarcinile lor fiind mereu de semn opus, acesta s-ar putea face supunând perechea de particule unui câmp electric intens. Deşi în laborator se poate efectua un asemenea experiment, el nu explică crearea particulelor în universul timpuriu. Pe atunci nu exista un câmp electric intens care să producă separări ale materiei la scară mare; altminteri, universul (şi distribuţia galaxiilor sau a radiaţiei de fond) ar fi mult mai puţin izotrop, ca urmare a orientării acelui câmp electric.

Pe de altă parte, putem separa particulele „întinzând” terenul pe care se află, ceea ce se întâmplă într-un univers care se extinde accelerat. Spaţiul-timp însuşi e dilatat atât de repede, încât particulele şi antiparticulele care apar în vid, aflându-se la distanţă mare una de alta, nu se mai anihilează reciproc, ci supravieţuiesc ca particule create din vid. Conform acestui scenariu inflaţionar, universul a produs materie, deci toate structurile vizibile în prezent, într-o distribuţie iniţială aproape omogenă. Astfel, întregul conţinut

de materie din univers este rezultatul fluctuaţiilor cuantice, amplificate de gravitaţie.[63] Pentru aceasta nu e nevoie decât de o fază de expansiune accelerată sau de o formă de materie cu presiune negativă.

Teoria are dificila sarcină de a găsi dovezi convingătoare pentru existenţa unei asemenea materii ascunse. În plus, e complicat să obţii o presiune negativă pentru un timp suficient de lung. În cele mai simple şi mai elegante modele de inflaţie, presiunea negativă trebuie să dureze atât de mult, încât universul să se extindă cu un factor de 10^{20}, altminteri n-ar rezulta distribuţia omogenă a materiei observată în radiaţia cosmică de fond.

Matematic poate fi concepută o asemenea formă de materie, dar ea necesită interacţii cu totul speciale, precum şi valori iniţiale pentru ca ea să fie supusă unei presiuni negative. Aceasta seamănă cu crearea unei presiuni negative pe Pământ, care poate fi de pildă obţinută prin suprarăcirea unei cantităţi de materie. Cum materia se contractă când e răcită, atunci când e închisă într-un recipient această contracţie implică o atracţie care e percepută ca presiune negativă. Asemenea condiţii pot li întâlnite, dar ele nu apar în mod obişnuit. Pe de o parte, e nevoie de instalaţii experimentale speciale, pe de alta, rareori presiunea negativă e menţinută un timp îndelungat. Schimbul de căldură cu mediul va reîncălzi imediat materia suprarăcită, iar presiunea negativă va dispărea. Admiţând că universul poate produce o presiune negativă, cum anume o face rămâne un mister.

Poate fi observată gravitaţia cuantică?
În căutare de indicii

Ceea ce observăm sau deducem că apare în univers nu e o presiune negativă, ci o expansiune accelerată. Presiunea negativă e sigurul mijloc clasic prin care relativitatea generală poate genera, în condiţii speciale, forţe repulsive, în ciuda faptului că în mod normal gravitaţia e atractivă. Ceea ce ne interesează în primul rând e însă o explicaţie a acceleraţiei şi a forţei repulsive, iar aici, ca şi în cazul problemei singularităţii, gravitaţia cuantică ne-ar putea veni în ajutor, astfel încât să evităm complicaţiile legate de presiunea negativă.

Spre deosebire de energia întunecată, care trebuie explicată într-un univers mare, unde se presupune că efectele gravitaţiei cuantice nu sunt importante, aspectele cuantice ale spaţiului-timp ar putea juca un rol decisiv în universul timpuriu şi fierbinte, în această fază, conform cosmologiei cuantice cu bucle, o forţă gravitaţională cuantică repulsivă acţionează pentru a opri colapsul universului precedent la big bang şi pentru a-l transforma în expansiunea vizibilă astăzi – la fel cum o piatră aruncată în sus întâi încetineşte, se opreşte o clipă, pentru a cădea apoi tot mai repede. Forţele efective ale cosmologiei cuantice cu bucle ar putea într-adevăr face ca un univers minuscul să se extindă accelerat, fără să fie nevoie de o materie aparte supusă unei presiuni negative. Acceleraţia ar fi o consecinţă a noului comportament al gravitaţiei – o forţă care, la energii înalte şi la dimensiuni minuscule ale universului se abate de la relativitatea generală. Dacă forţa gravitaţională nu mai e pur atractivă, ci are o componentă

repulsivă, chiar şi pentru materia obişnuită poate fi explicată expansiunea accelerată.

Nu se ştie însă deocamdată dacă acest grad de accelerare e suficient. În orice caz, problema orizontului nu apare în absenţa unui punct iniţial cum e singularitatea big bang, dar, la fel ca în modelele inflaţionare bazate pe presiune negativă, expansiunea trebuie să fie suficient de mare pentru a conduce la o distribuţie omogenă a materiei. Cum anume e posibil acest lucru încearcă să afle, între alţii, cercetătorii britanici David Mulryne, Nelson Nunes şi Marvam Shaeri, francezii Aurelien Barrau, japonezul Shinji Tsujikawa şi italianul Gianluca Calcagni.

Cercetările cosmologice se bazează pe deducerea unor ecuaţii care să descrie mici perturbări în distribuţia materiei. O structură de tip reţea a spaţiului-timp conduce la abateri de la ecuaţiile continue ale relativităţii generale, abateri ce ar putea fi evaluate şi comparate cu observaţiile. Mult timp nu s-a ştiut dacă asemenea calcule pot fi într-adevăr efectuate. În relativitatea generală avem de-a face cu un set de ecuaţii supradeterminat: sunt mai multe ecuaţii de rezolvat decât variabile libere, ceea ce face dificilă găsirea unei teorii cuantice a gravitaţiei, în relativitatea generală, setul de ecuaţii e consistent, dar, dacă sunt incluşi termenii suplimentari ai forţelor efective, aşa cum rezultă ei din gravitaţia cuantică, nu mai e uşor de păstrat consistenţa. Dacă două dintre ecuaţii dau soluţii diferite pentru aceeaşi variabilă, nu mai poate exista o soluţie consistentă comună a tuturor ecuaţiilor. Totuşi, pentru un tip de corecţie cuantică s-a obţinut recent consistenţa în calculele efectuate de Golam Hossain şi Mikhail Kagan, aşa încât există acum un set de ecuaţii care să fie analizate de cosmologi.

Gravitaţia cuantică cu bucle poate fi deci testată. De regulă, efectele gravitaţiei cuantice sunt mici chiar şi în apropierea big hang-ului, dar în unele

cazuri ele se pot acumula la scara timpului cosmic, aşa încât ar putea fi observate. Dacă aceasta s-ar întâmpla, ar fi un moment crucial în fizica teoretică, fiindcă deocamdată nu există indicii experimentale pentru forma exactă a gravitaţiei cuantice. Aşa cum datele experimentale – spectrele atomice, de pildă – au călăuzit dezvoltarea mecanicii cuantice, observaţiile vor juca un rol esenţial în făurirea unei versiuni complete a gravitaţiei cuantice.

În gravitaţia cuantică cu bucle, observaţiile, chiar şi cele indirecte, ar avea şi un alt avantaj: ele ar oferi informaţii privind forţa repulsivă care, la big bang, a provocat nu numai expansiunea accelerată a universului, dar a şi oprit contractarea vechiului univers pentru a o transforma în dilatarea celui actual. Din observaţii precise asupra forţei repulsive şi a acţiunii ei în faza big bang am putea trage concluzii chiar despre universul-părinte. Am putea zări, fie şi indirect, ceva din universul de dinainte de big bang!

E nevoie nu doar de date mult îmbunătăţite privind radiaţia cosmică de fond, iar satelitul Planck a făcut deja un mare pas înainte în acest sens, dar trebuie exploatate şi alte surse de semnale. Aparatele noastre de măsură n-au acces la radiaţia electromagnetică din chiar primele etape ale big bang-ului, aşa încât avem nevoie de alţi mesageri, purtând un semnal mai vechi – neutrinii sau undele gravitaţionale.

În plus, aceste mesaje sunt împrăştiate, limitându-ne accesul la momentele de început. Cu ajutorul neutrinilor ne putem apropia la o secundă după big bang, în vreme ce radiaţia de microunde îşi are originea cu aproape o jumătate de milion de ani mai târziu. Dar tot nu-i de ajuns. În gravitaţia cuantică, o secundă conţine un număr colosal (unul cu 42 de cifre) de paşi temporali discreţi. Undele gravitaţionale ar putea proveni din momente şi mai îndepărtate în timp, dar cât de îndepărtate sunt ele

gravitaţia cuantică nu ne poate spune deocamdată. Nici undele gravitaţionale nu ne pot aduce însă oricât de departe în timp. Principiul uitării cosmice ne limitează şi el observarea directă a universului precedent.

Cum am putea atunci obţine informaţii indirecte despre universul de dinainte de big bang? Comparaţia cu separarea picăturilor de apă, făcută mai devreme, ne este şi aici utilă. Separarea e asemănătoare cu singularitatea big bang şi cu evitarea ei în cosmologia cuantică cu bucle, picătura de apă continuu jucând rolul foii geometrice netede de cauciuc din relativitatea generală. Din această perspectivă, separare prezintă o singularitate uşor de explicat şi de rezolvat în teoria atomică a apei la fel cum timpul discret al cosmologiei cuantice cu bucle deschide accesul către universul de dinainte de big bang. (în picătura de apă nu există însă nicio forţă repulsivă care să împiedice separarea singulară.) Ceea ce se distruge este foaia de cauciuc a imaginii clasice, nu lumea atomică reală.

La fel cum e dificil, dacă nu imposibil, să căutăm vreo formă de viaţă dinainte de big bang – bacteria *E. coli,* de pildă – în picătura de apă desprinsă, unele informaţii privind apa rămasă în robinet sunt iremediabil pierdute, un efect comparabil în linii mari cu uitarea cosmică. Totuşi, înainte şi în timpul separării a existat un contact între apa din picătură şi cea din robinet, deci anumite informaţii pot ajunge în picătură. Spre exemplu, compoziţia chimică a apei – cantităţile relative de minerale pe care le conţine – nu se schimbă la separarea picăturii: putem astfel deduce compoziţia apei din robinet pe baza aceleia din picătură, care e direct accesibilă şi uşor de determinat.

Se pot însă obţine informaţii şi pe cale indirectă. Când se separă, molecula începe să vibreze uşor, lucru observabil şi dinăuntrul ei. Dispunând de

date precise şi de o teorie corectă, calculele ne pot purta înapoi în timp, până la momentul separării, şi putem deduce de unde provine picătura. Şi în cosmologie ne folosim de vibraţii – cele ale materiei din universul timpuriu, care se regăsesc în microunde, iar în viitor vor fi poate detectate în undele gravitaţionale –, şi îndrăznim să tragem concluzii privind momente mult anterioare.

Alte posibilităţi de testare:
Să nu renunţi niciodată

În afară de cosmologia universului timpuriu, există şi alte situaţii în care teoria se poate confrunta cu observaţiile. Nu se ştie încă dacă efectele gravitaţiei cuantice sunt suficient de mari îţi aceste cazuri şi, admiţând că aşa ar sta lucrurile, dacă ele ne vor modifica semnificativ perspectiva. Pentru observaţiile cele mai fine e însă important să acordăm atenţie fenomenelor independente care sugerează un nou fenomen fizic, aşa cum sunt indiciile privind materia întunecată – distribuţia radiaţiei de fond, hărţile galaxiilor, supernovele. Abia atunci un model poate fi aplicat întregului univers. În mod asemănător, indiciile privind gravitaţia cuantică vor deveni convingătoare doar prin coroborarea unor surse independente.

Nucleosinteza big bang:
Prepararea elementelor

În timpul fazei fierbinţi a big bang-ului, expansiunea violentă, poate accelerată, n-a avut ca rezultat doar un univers deja destul de mare, ci şi excitarea unor particule din vid, asemenea valurilor provocate de un cutremur submarin. Spaţiul nu era gol, el conţinea materie şi energie. Energia era însă prea mare pentru a exista nuclee atomice sau materie aşa cum o cunoaştem. Toate particulele separate, cum ar fi protonii sau neutronii, zburau liber. Dacă din întâmplare un proton şi un neutron se apropiau şi se cuplau pentru a forma un nucleu, acesta era imediat spulberat de o altă particulă de energie înaltă.

Chiar şi particulele individuale aveau un timp de viaţă scurt, fiindcă densitatea mare de materie făcea probabilă întâlnirea unei particule cu o antiparticulă, pentru a se anihila reciproc şi a rămâne în urmă energia lor totală sub formă de fotoni. Dar particulele nu dispăreau complet: când erau împrăştiaţi de particulele încărcate, fotonii puteau crea din nou perechi de particulă-antiparticulă care reluau ciclul naşterii şi al dispariţiei.

Acest măcel general n-a dura însă la nesfârşit, căci universul se dilata, se dilua şi se răcea. Energia fotonilor a scăzut treptat, până când n-a mai fost suficientă pentru crearea perechilor de particulă-antiparticulă. La început au încetat să fie produse perechile de proton-antiproton şi neutron-antineutron, dar nu şi perechile de electron-pozitron, fiindcă electronii şi pozitronii au o masă de vreo două mii de ori mai mică decât cea a protonului, deci formarea lor cere un efort

energetic mult mai mic. Anihilându-se în continuare cu antiparticulele lor, protonii şi neutronii au început să dispară din univers, lăsând în urmă doar energia lor.

Unul dintre marile mistere ale cosmologiei şi fizicii particulelor este de ce au reuşit să supravieţuiască în număr mare până în prezent, şi n-au fost complet anihilaţi în întâlnirile cu antiparticulele lor.[64] Suntem aproape siguri că întreaga materie vizibilă e constituită din materie, şi nu din antimaterie: în spaţiul dintre galaxii există hidrogen, iar, dacă ar avea loc anihilarea cu o antigalaxie, ar fi emisă o radiaţie caracteristică. Pentru a lamuri misterul nu putem presupune pur şi simplu că materia şi antimateria sunt separate, Armagedonul lor fiind împiedicat de vreo forţă de menţinere a păcii din universul nesfârşit. O disparitate în favoarea materiei trebuie fie să fi existat de la bun început, fie să fi apărut în cursul timpului.

Dar în felul acesta apar noi probleme. O disparitate iniţială nu poate fi explicată, ci doar postulată. Pe de altă parte, e greu de închipuit o disparitate pe baza legilor cunoscute ale fizicii. (Scenarii posibile au fost analizate pentru prima dată în 1967 de Andrei Saharov.) Între particule şi antiparticulele lor există simetrii care corelează strâns ratele lor de producere şi interacţie. Deşi aceste simetrii nu sunt perfecte, abaterea de la ele, cunoscută din experimente, e foarte mică. Nu s-a găsit încă un mecanism convingător care să conducă la o disparitate suficient de mare între materie şi antimaterie.

În privinţa asta gravitaţia cuantică nu are multe de oferit, aşa încât trebuie să luăm de bună această disparitate. Universul conţinea deci un ocean de particule elementare care, în linii mari, cu excepţia electronilor, nu era perturbat de antimaterie: existau electroni şi pozitroni, protoni, neutroni, omniprezenţii neutrini, precum şi fotoni la energii

înalte. Expansiunea a făcut ca universul să devină atât de rece spre sfârşitul fazei big bang, încât majoritatea particulelor care se mişcau liber îşi pierduseră mult din energia lor şi puteau forma acum nuclee stabile. Această tranziţie poartă numele de *nucleosinteză big bang.*

În comparaţie cu bogăţia de elemente chimice care se găsesc acum pe Pământ, nucleosinteza big bang a produs foarte puţine – doar un izotop greu al hidrogenului numit deuteriu (al cărui nucleu conţine nu numai un proton, ci şi un neutron), heliu şi câteva elemente uşoare cum e litiul, dar cantităţile relative ale acestor elemente au determinat evoluţia universului şi compoziţia sa ulterioară. Cel mai abundent a fost hidrogenul (75%), urmat de heliu. Existau un nucleu de deuteriu la o sută de mii de alte nuclee şi doar câteva nuclee de litiu la zece miliarde de alte nuclee. Masa tuturor celorlalte elemente mai grele reprezenta doar 1% din masa totală. Nucleosinteza elementelor grele a continuat apoi în stele, unde s-a produs întreaga materie a planetelor, dar nucleosinteza big bang a fost decisivă pentru abundenţele relative ale elementelor pe care le observăm azi.

Procesele din cursul nucleosintezei big bang au fost atât de delicate, încât cele mai mici variaţii ale raporturilor particulelor elementare şi ale radiaţiei electromagnetice ar fi condus la abateri mari faţă de ce observăm azi. Aici teoriile gravitaţiei pot fi puse la încercare: cantităţile particulelor sunt determinate de diluarea provocată de expansiunea universului şi, reciproc, cantitatea totală a diferitelor particule influenţează rata de expansiune prin atracţia lor gravitaţională. Din abundenţele elementelor la scurt timp după big bang putem deci trage concluzii privind forţa gravitaţională din acel moment.

În această etapă, forţele repulsive ale gravitaţiei cuantice nu mai sunt dominante, dar chiar şi

contribuţia atractivă a forţei poate fi suspusă unor mici modificări în comparaţie cu relativitatea generală. Asemenea modificări pot perturba echilibrul delicat al nucleosintezei, astfel încât amploarea lor şi teoria din care decurg ele sunt supuse unor constrângeri, cel puţin în principiu. La rândul tor, aceste constrângeri pot fi folosite pentru a analiza structura atomică a spaţiului-timp răspunzătoare pentru abaterile de la forţele clasice. Avem aici şi un fel de microscop indirect: deşi nu vedem direct atomii spaţio-temporali, proprietăţile lor pot fi sondate prin efecte asupra particulelor elementare. Calculele sunt însă extrem de complicate. Conform studiilor pe care le-am întreprins recent împreună cu Rupam Das şi Bob Scherrer, se pare că e nevoie de observaţii mult mai precise decât cele actuale privind abundenţa elementelor rezultate din nucleosinteza pentru a putea testa gravitaţia cuantică.

Spaţiul-timp ca un cristal:
Giuvaere goale

La energii suficient de înalte, în universul actual pot apărea efecte care, aidoma unui microscop, să pună în evidenţă structura atomică a spaţiului-timp. Dacă spaţiul-timp are într-adevăr o structură atomică discretă, pentru propagarea luminii el se comportă aproximativ ca un cristal. Într-un mediu nestructurat cum e vidul, indiferent de lungimea ei de undă, lumina se comportă la fel. În particular, are aceeaşi viteză. Dimpotrivă, într-un mediu de natură atomică, aşa cum e un cristal transparent, diferitele culori sunt supuse unor reguli de propagare diferite.

Într-un mediu, lumina se propagă excitând oscilaţiile particulelor încărcate şi sărind astfel din atom în atom pentru a parcurge întregul cristal. Luminii cu lungime de undă mai mică – cu frecvenţă mai mare, aproape de capătul albastru al spectrului vizibil – îi e mai greu să excite vibraţiile atomilor leneşi din cristal: dacă lungimea de undă se apropie de distanţa dintre atomi, devine tot mai complicat ca ea să ajungă la atomii vecini. Mediul o frânează mai mult decât frânează lumina cu lungime de undă mai mare, deci, prin comparaţie, viteza ei de propagare scade.

O consecinţă bine cunoscută e dispersia luminii albe în benzi monocolore – cazul curcubeului sau al luminii care trece printr-o prismă. Modificarea vitezelor influenţează unghiurile de refracţie ale undelor la suprafaţa care separă cristalul de aer.

Dacă suprafeţele de separare nu sunt paralele, ca în cazul unei prisme, lumina albă incidenţă iese din cristal descompusă în toate culorile sale componente.

Dacă, asemenea unui cristal, spaţiul-timp e atomic, chiar şi în absenţa materiei lumina de diferite lungimi de undă nu se mai propagă cu aceeaşi viteză. Parcurgând spaţiul gol de la o stea îndepărtată până la noi, apar efectele dispersiei: undele de diferite frecvenţe ajung cu diferite întârzieri, deşi au fost emise de stea simultan. Ca şi în cazul precedent, corecţiile individuale în comparaţie cu propagarea printr-un spaţiu-timp nestructurat sunt foarte mici. Dar, dacă steaua e suficient de îndepărtată, aceste efecte minuscule s-ar putea acumula în lunga călătorie a luminii, conducând la o întârziere în timp observabilă.[65]

Pentru ca întârzierea să fie mare, steaua trebuie să fie foarte îndepărtată, ceea ce o face greu de observat, Apoi, nu putem folosi o stea care străluceşte uniform – n-am putea determina ce părţi ale radiaţiei au fost emise simultan şi n-am obţine nicio informaţie despre întârziere. Avem nevoie de o erupţie îndepărtată, o explozie de scurtă durată, dar mai intensă decât o supernovă. Din fericire, asemenea evenimente există: *exploziile de raze gama*[66], care durează fracţiuni de secundă şi eliberează mai multă energie decât o mie de sori în întreaga lor viaţă!

La început s-a crezut că aceste explozii au loc în Calea-Lactee, fiindcă era greu de închipuit ca un obiect foarte îndepărtat să producă asemenea strălucire. Dar, pe măsură ce erau descoperite tot mai multe, ele aveau o distribuţie practic izotropă pe întreg firmamentul, fără vreo legătură cu structura Căii-Lactee. Exploziile de raze gama trebuie deci să provină din afara galaxiei noastre.

Aceste explozii au o energie atât de mare, încât majoritatea radiaţiei emise nu e formată din lumină vizibilă, ci din particule gama, cunoscute şi dintr-o formă de radioactivitate. Ele sunt, la fel ca lumina, unde electromagnetice, dar de frecvenţă extrem de înaltă (lungime de undă mică), ceea ce constituie un avantaj în studierea structurilor spaţio-

temporale. Lungimea de undă e mai aproape decât cea a luminii vizibile de scara dimensională la care ne aşteptăm ca structura spaţiului-timp să fie discretă – deşi diferenţa până la lungimea Planck rămâne enormă, prin urmare corecţiile pentru propagarea printr-o structură cristalină sunt mai pronunţate şi mai uşor de detectat. (Din cauza efectelor cuantice, frecvenţa n-ar trebui să fie totuşi prea mare. Dacă pachete de energie individuale din care e compusă radiaţia – fotonii – au energie mai mare, deci frecvenţă mai mare, energia totală a radiaţiei e distribuită în mai puţine pachete. Prin urmare, mai puţine cuante lovesc detectorul, iar măsurătorile sunt supuse unor fluctuaţii statistice mai mari care fac să scadă precizia.)

În iunie 2008, a fost lansat satelitul GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope, numit acum Fermi Gamma-ray Space Telescope) cu misiunea de a detecta asemenea erupţii. Datele oferite de el au adus noi informaţii despre comportamentul şi distribuţia acestor explozii stelare, şi rămâne de văzut dacă ele vor fi semnificative pentru gravitaţia cuantică. O posibilă cauză a erupţiilor ceva mai lungi este colapsarea unei stele într-o gaură neagră. La începutul anilor 1990, Peter Meszaros şi Martin Rees au analizat felul în care energia colapsării se poate converti în radiaţie gama, iar calculele lor sunt în acord cu numeroase observaţii. (O explicaţie pentru exploziile mai scurte este contopirea a două stele neutronice, care în cele din urmă conduce iarăşi la formarea unei găuri negre.) Indiferent dacă lucrurile stau sau nu aşa, găurile negre oferă o altă posibilitate de explorare a gravitaţiei cuantice.

Găurile negre: Lumi ale întunericului

Găurile negre sunt afectate de aceeaşi problemă a singularităţii ca întreg cosmosul. În cazul lor nu colapsează tot universul, ci doar materia conţinută într-o regiune mărginită. În cele din urmă însă, relativitatea generală se confruntă cu apariţia unei singularităţi care înghite nu numai întreaga materie, dar şi spaţiul, şi timpul. Forţele repulsive ale gravitaţiei cuantice pot împiedica colapsul total şi apariţia singularităţii, după cum vom vedea în capitolul următor. Deocamdată ceea ce ne interesează este posibilitatea de a observa efectele importante ale acestui proces.

Găurile negre sunt obiecte neobişnuite, aşa încât existenţa lor în univers a fost multă vreme pusă la îndoială (ceea ce se întâmplă din când în când şi azi), dar sunt acum confirmate de numeroase observaţii. Dată fiind densitatea lor, unele obiecte astronomice nu pot fi înţelese decât ca găuri negre. Ele par distribuţii de masă puternic comprimate într-o regiune spaţială mică, cu o densitate enormă faţă de cea a altor obiecte stelare (dar mult mai mică decât densitatea Planck).

Cea mai convingătoare dovadă în favoarea existenţei găurilor negre se află în centru galaxiei noastre. Telescoapele în infraroşu ne-au permis să aruncăm o privire în acest ansamblu de stele, în ciuda luminii intense care îl înconjoară. Putem chiar identifica stele şi urmări cum se rotesc în jurul centrului galaxiei, cam la fel cum se rotesc planetele în jurul Soarelui.[67] Din dimensiunea orbitelor şi valoarea vitezelor deducem forţa gravitaţională care acţionează asupra lor. Aceasta ne spune că masa concentrată în mijlocul galaxiei e enormă – milioane de mase solare –, dar niciun obiect central, cum ar fi o stea, n-a fost identificat.

Masa e concentrată într-o regiune prea mică, de dimensiunea unei singure stele. Dacă ar fi o stea puternic comprimată, ar trebui să radieze violent, ceea ce ar face-o vizibilă de la mare distanţă. Nu există o altă explicaţie decât prezenţa unei găuri negre în centrul galaxiei, un general dur care îşi înghite propria-i lumină şi comandă unei armate de stele, întreaga galaxie, să mărşăluiască în jurul lui.

De regulă, găurile negre sunt foarte grele, fiindcă trebuie să colapseze multă materie pentru a genera o asemenea forţă gravitaţională. Dacă se întâmplă să colapseze doar o cantitate mai mică de materie, de dimensiunea Soarelui, să zicem, cea mai mare parte a ei e ejectată înainte să se poată forma gaura neagră. Din moment ce efectele gravitaţiei cuantice într-un univers mare e de aşteptat să fie mici, ele sunt slabe în vecinătatea găurilor negre masive, şi pot fi importante abia în centrul lor, în apropierea singularităţii de densitate maximă, dar această regiune e adânc îngropată în gaura neagră, ruptă de exterior şi inaccesibilă observaţiilor. Deşi gaura neagră nu are o suprafaţă cum au planetele sau stelele, ca e înconjurată de un înveliş ciudat numit orizont. Proprietăţile lui vor fi analizate în capitolul următor, deocamdată să spunem însă că, la o gaură neagră masivă, acest văl se află departe de singularitate, împiedicând accesul la efectele puternice ale gravitaţiei cuantice. Pentru observaţii trebuie deci să ne mulţumim cu efectele slabe din vecinătatea învelişului.

Deşi în acea zonă nu sunt efecte cuantice puternice ale gravitaţiei, pot apărea cele ale materiei. Structura spaţiului-timp se modifică spectaculos, fiindcă ne aflăm la frontiera dintre exterior, unde căderea spre gaura neagră mai poate fi încă împiedicată prin forţe suficient de mari, şi interior, unde acest lucru nu mai e posibil. Odată traversat orizontul, nu mai e cale de întoarcere; din perspectivă clasică, eşti ireversibil atras pentru a fi

strivit în singularitate. În interior, forţa gravitaţională e copleşitoare şi nu poate fi contrabalansată de nicio altă forţă.

În acest regim, spaţiul-timp se deosebeşte de cel familiar, şi seamănă cu un sol care se cutremură, la fel ca în cazul inflaţiei. La fel ca în cosmologia unui univers accelerat, din vid se creează materie; fluctuaţiile cuantice produc un număr nenul de particule, sau, mai intuitiv, diferenţa dintre forţele din interior şi cele din exterior poate rupe perechile particulă-antiparticulă. Un membru al perechii cade în gaura neagră, celălalt evadează şi poate mai târziu lovi un detector. Fenomenul, descoperit de Stephen Hawking în 1973, poartă numele de radiaţie Hawking a găurilor negre.

La găurile negre masive radiaţia e foarte slabă, mai slabă chiar decât cea din fondul cosmic de microunde. Găurile negre mari nu pot fi detectate prin acest fenomen, fiindcă radiaţia Hawking a lor e pur şi simplu înecată în fondul cosmic. Găurile negre mici radiază însă mai intens: învelişul lor se află mai aproape de singularitatea centrală, iar diferenţele dintre forţele din vecinătatea lor sunt mai pronunţate. Forţe suficient de puternice pot face ca radiaţia să fie mai intensă decât cea a fondului cosmic, astfel încât aceste găuri negre pierd mai multă energie prin radiaţia Hwaking decât câştigă absorbind radiaţia de fond.

Odată ce radiaţia Hawking depăşeşte în intensitate fondul, gaura neagră pierde ireversibil energie. Orizontul învelişului se apropie tot mai mult de centru, ceea ce amplifică radiaţia. Gaura neagră se poate evapora complet după un timp finit, dacă nu cumva gravitaţia cuantică modifică echilibrul, odată ce orizontul se apropie de singularitatea centrală. Aceasta poate deschide noi posibilităţi de observaţie, presupunând că asemenea obiecte au existat în trecutul recent al universului şi într-adevăr s-au evaporat. Nu se ştie cu precizie ce se întâmplă cu aceste găuri negre,

spectrul posibilităţilor se întinde de la evaporarea completă la dispariţia învelişului, făcând ca interiorul să fie vizibil din afară. În acest din urmă caz ar avea loc o explozie care să dezvăluie o parte din materia colapsată – doar o parte, pentru că o cantitate de energie a fost deja radiată în procesul Hawking.

Putem oare folosi acest efect pentru a face observaţii care să testeze gravitaţia cuantică? Pesemne că nu, oricât de fascinant ar fi. Fondul cosmic este încă prea intens, deşi radiaţia lui s-a răcit deja până la -270°C. Pentru ca evaporarea să aibă loc e nevoie de găuri negre foarte mici, dar ele se vor fi evaporat demult, fiindcă procesul e rapid. Asemenea evenimente ar putea fi într-o bună zi surprinse cu telescoape mai puternice.

După cum se vede, nu ne aflăm într-un moment propice observării radiaţiei Hawking. În viitor am putea fi mai norocoşi dacă expansiunea cosmosului va face ca fondul de microunde să se dilueze suficient de mult pentru ca până şi găurile negre masive să se evapore, dezvăluind fenomene noi.

CAPITOLUL 6.
Găurile negre.
Colaps şi un final fericit?

Chipul lui priveşte spre soare,
Iar apoi, brusc, n-a mai rămas nimic din el.

Epopeea lui Ghilgameş

Capsula Kruskal[168] *este pe punctul de a se dezintegra. Pătrunde tot mai adânc în amestecul de materie fierbinte şi densa, care abia poate fi recunoscută ca o stea în colaps. Nu are echipaj la bord, fiindcă niciun om, ba chiar nicio celulă, n-ar rezista la asemenea forţe. Folosindu-se femtotehnologia modernă, a fost construită la dimensiuni atât de mici pentru ca diferenţa dintre forţele care acţionează asupra diverselor părţi ale ei să fie minimă. Nucleele din interiorul ei dansează nebuneşte într-un spaţiu-timp ca o spumă. Instrumentele miniaturale rezistă cu greu în asemenea condiţii. Acum, când capsula a depăşit orizontul găurii negre, nu mai e cale de întoarcere, nici reparaţiile nu mai sunt posibile. Atrasă fiind tot mai aproape de centru, nici cele mai puternice motoare n-o pot ajuta să scape.*

Cu cât înaintează capsula, cu atât devin mai puternice forţele mareice care acţionează asupra ei: aici spaţiul-timp e atât de curbat, încât diferenţa dintre forţa gravitaţională de la un capăt şi cea de la celălalt capăt e

imensă, în ciuda dimensiunilor minuscule ale capsulei. Capsula e deformată de gaura neagră la fel cum se întâmplă, la o scară mult mai mică, cu oceanele şi chiar cu masele continentale prinse în războiul gravitaţional dintre Pământ şi Lună. Materialele nu pot rezista prea mult, curând sonda va fi dezmembrată. Şi componentele el vor fi sfărâmate mai departe, pentru a se dizolva în cele din urmă în cele mai mici particule.

Până atunci însă, inima capsulei, transformatorul Chiao îşi va face datoria. Este creaţia fizicianului Raymond Chiao, care a postulat posibilitatea de a transforma undele electromagnetice în unde gravitaţionale. Pe baza acestui principiu, capsula transformă o parte din radiaţia care ajunge continuu la ea, împărtăşind aceeaşi soartă odată ce a trecut dincolo de orizont, în unde gravitaţionale. Ea emite deci unde gravitaţionale cu o frecvenţă ce depinde de deformarea transformatorului Chiao, iar astfel codifică forţele mareice pe care le resimte într-un semnal de unde gravitaţionale. Mai mult, atunci când a părăsit satelitul Hawking 3, capsula a fost pusă să vibreze, astfel încât la deformarea continuă se adaugă o oscilaţie rapidă. Semnalul modulat anume pentru ca, într-un viitor îndepărtat, să poată fi identificat cu uşurinţă dacă e captat. Capsula torturată trimite deci un mesaj conţinând impresiile sale de călătorie…

Cam aşa ar arăta explorarea unei găuri negre în viitor. Pare totuşi o întreprindere puţin probabilă: cine ar organiza şi finanţa o asemenea misiune? Capsula ar fi fără îndoiala distrusă în cele din urmă – soartă care nu se deosebeşte de cea a sateliţilor noştri. Numai că, în cazul ei, informaţiile

transmise nu vor ajunge la noi. Chiar dacă descoperă lucruri remarcabile, nu va dezvălui nimic.

Singura şansă ca o asemenea misiune să fie finanţată ţine de gravitaţia cuantică. Forţele repulsive ar putea împiedica gaura neagră să colapseze complet într-o singularitate şi ar permite materiei, cum e cea din care e alcătuită capsula, sau măcar semnalelor emise de ea, să scape. Deocamdată niciun fizician n-ar lua în serios acest proiect, dar o călătorie teoretică în găurile negre nu se izbeşte de asemenea limitări şi poate dezvălui lucruri interesante. Iată o primă întrebare: de ce nimic nu poate scăpa, nici măcar lumina? Apoi, cum ar percepe capsula regiunea centrală a găurii negre? Este oare centrul un punct în spaţiu, ca un soare minuscul, dar extrem de masiv, de care e inexorabil atrasă?

După cum vom vedea, în relativitatea generală, singularitatea centrală a unei găuri negre e de un cu totul alt tip. N-o putem vedea, nici dacă am trecut de orizont; o putem simţi doar prin forţele mareice tot mai intense. E invizibilă, pentru că pur şi simplu nu există! Singularitatea se formează doar în momentul în care suntem pe punctul de a o atinge. Pentru a ne face o imagine despre asta, trebuie să privim dintr-o perspectivă mai largă şi să vorbim despre formarea găurilor negre şi imposibilitatea de a evada din ele.

Calea către o gaură neagră:
A te juca cu focul

Colapsul gravitaţional conduce la comprimări tot mai dense ale materiei concentrate, ca rezultat al atracţiei gravitaţionale dintre toate componentele ei. În cazul stelelor stabile, acţionează unele tipuri de forţe contrare care încetinesc colapsul. Pornind cu o stea obişnuită care şi-a consumat combustibilul iniţial hidrogenul concentrat în ea după neucleosinteza big bang, aşa cum am văzut în capitolul precedent există câteva trepte de stabilizare, în funcţie de masa iniţială.

Primele stele:
Arderea combustibilului

Majoritatea stelelor vizibile obţin prin fuziune energia pe care o radiază sub formă de lumină vizibilă şi alte unde. La fel ca în nucleosinteza big bang, cele mai uşoare elemente – hidrogenul şi heliul – sunt principalii actori. Hidrogenul conţine un singur proton în nucleu. La hidrogenul obişnuit nucleul constă doar din acest proton, dar în nucleul hidrogenului greu (deuteriu) se mai află şi un neutron. Distanţa dintre cele două particule e foarte mică, ceea ce face ca nucleul să fie mult mai mic decât atomul, a cărui dimensiune e dată în principal de spaţiul ocupat de funcţia de undă a electronului. Există şi o specie de hidrogen numită tritiu, cu doi neutroni în nucleu, dar aceasta e instabilă, având un timp de viaţă de 4500 de zile. Neutronul nu are sarcină electrică, prin urmare în toate cele trei cazuri nucleul are aceeaşi sarcină, iar atomul neutru de hidrogen are un singur electron în jurul nucleului. Toate aceste trei specii diferite de hidrogen, numite izotopi, au aceleaşi proprietăţi chimice, date de prezenţa unui singur electron. Deşi masele atomilor de hidrogen variază în funcţie de numărul de neutroni din nucleu, aceasta nu influenţează prea mult interacţiile cu alţi atomi. În mod asemănător, nucleele de heliu conţin doi protoni şi, la cele stabile, unul sau doi neutroni. Un atom neutru de heliu are doi electroni.

Doi atomi de hidrogen se pot apropia unul de altul, fără ca la început să se respingă, fiindcă sunt neutri electric. Ba chiar, din punct de vedere energetic, e avantajos să formeze o pereche – coabitare ce le permite să-şi pună în comun

electronii într-un mod mai economic. În felul acesta se formează o legătură chimică: cei doi atomi alcătuiesc o moleculă de hidrogen constând din două nuclee şi o funcţie de undă orbitală comună pentru cei doi electroni. Nucleele sunt ţinute la distanţă pentru că ambele au sarcină electrică pozitivă. Aceasta e molecula de hidrogen pe care o cunoaştem din chimie. Pe Pământ, în prezenţa oxigenului din atmosferă, rămâne cu greu în formă stabilă, fiindcă, iarăşi din motive energetice, hidrogenul şi oxigenul se pot combina pentru a forma molecula de apă printr-o reacţie violentă. În universul timpuriu însă, din primii protoni şi electroni nu se formase oxigen, aşa încât hidrogenul a rămas liber pentru a constitui combustibilul stelelor.

De unde obţin atunci stelele energie, dacă lipseşte oxigenul pentru a arde hidrogenul lor? La început, după nucleosinteza big bang şi odată ce universul se răcea şi se extindea, s-au format nori uriaşi de hidrogen. La fel ca radiaţia cosmică de fond, care stă mărturie pentru ce s-a întâmplat atunci, şi la fel ca toată materia formată în cursul nucleosintezei, aceşti nori erau iniţial aproape omogeni. Cum totuşi nu erau perfect omogeni, s-au format centri mai concentraţi acolo unde densitatea de masă era cu puţin mai mare decât în zonele învecinate. Chiar şi un asemenea surplus infim de masă atrage gravitaţional încă mai mult hidrogen din împrejurimi, crescând astfel şi mai mult densitatea. E un proces lent prin care unele regiuni devin foarte dense. După cum se vede, gravitaţia are nu numai tendinţe sadice culminând în singularităţi, dar şi tendinţe capitaliste: regiunile deja bogate devin şi mai bogate.

Hidrogenul e tot mai comprimat, aşa încât, cu concursul gravitaţiei, nucleele moleculei de hidrogen se pot apropia, în măsura în care le permite respingerea electrostatică dintre ele, iar astfel apare un prim echilibru al forţelor. Această

stabilitate, care explică existenţa planetelor, e obţinută în acest caz nu pentru atomii de hidrogen, ci pentru cei din interiorul planetei. Pământul şi celelalte planete au un grad înalt de stabilitate fiindcă sunt suficient de dense pentru ca gravitaţia să echilibreze forţele electrice dintre nuclee. Neexistând multă materie în vecinătate, masele lor nu mai pot creşte (lăsând la o parte infima contribuţie a meteoriţilor). În universul timpuriu mult mai puţin extins, lucrurile se petreceau cu totul altfel: în jurul centrilor denşi era încă o mare cantitate de hidrogen pentru a-i face să se întărească mai departe. Densitatea lor a crescut atât de mult, încât gravitaţia a făcut ca nucleele să fie şi mai apropiate.

Această situaţie nu putea dura. Când doi atomi de hidrogen se apropie prea mult, are loc o nouă reacţie: cei doi protoni apropiaţi, dar separaţi, au nevoie de mai multă energie decât un deuteron (o foarte strânsă combinaţie a unui proton cu un neutron; dacă un electron se leagă de el, deuteronul formează un atom de deuteriu neutru electric). Cele două particule sunt mult mai apropiate decât doi protoni, fiindcă asupra neutronului nu acţionează forţa de respingere electrică. Deuteronul se dovedeşte a fi stabil, protonul şi neutronul fiind legaţi prin forţa nucleară tare.

Această forţă, complet independentă de cea electromagnetică şi de cea gravitaţională, acţionează numai la distanţe scurte în raport cu scările de lungime obişnuite, dar, faţă de lungimea Planck, chiar şi aceste distanţe sunt uriaşe. Forţa nucleară tare devine activă doar când doi protoni se apropie suficient de mult, aşa cum se întâmplă în universul timpuriu – fie prin ciocniri întâmplătoare între protonii care se deplasează cu mare viteză în faza fierbinte a nucleosintezei big bag, fie sistematic în timpul comprimărilor datorate atracţiei gravitaţionale. Unul din protoni e

transformat într-un neutron şi un pozitron, iar celălalt proton se leagă de neutron pentru a forma un deuteron. Apare şi un neutrin, care interacţionează foarte slab, iar acesta părăseşte imediat scena. Pozitronul şi unul din electronii orbitali se anihilează reciproc, aşa încât, din doi atomi de hidrogen rezultă un atom de deuteriu şi se degajă o cantitate de energie, care contribuie la strălucirea stelei.

Astfel, hidrogenul e comprimat mai mult decât se pot apropia doi simpli protoni, fiindcă un nucleu ocupă mai puţin spaţiu decât două nuclee separate. Gravitaţia e însă nemiloasă. Deuteronii se apropie în continuare, la fel ca nucleele de hidrogen obişnuit, până când se declanşează alte reacţii. Doi deuteroni au exact aceeaşi combinaţie de particule ca un nucleu de heliu, iar, când se apropie, ei se pot combina formând heliu, iarăşi cu un câştig de energie datorat forţei nucleare de legătură. Aşa cum doi protoni fuzionează într-un deuteron, doi deuteroni fuzionează într-un nucleu de heliu – proces de care se leagă speranţele energetico ale omenirii, căci hidrogenul (combustibilul) e practic inepuizabil, iar produsul final (heliul) e nepoluant.

Fuziunea e posibilă în stele fiindcă gravitaţia comprimă hidrogenul, iar presiunea ridicată apropie suficient nucleele pentru a amorsa reacţia. Energia eliberată e mult mai mare decât la formarea deuteronilor şi constituie grosul energiei radiate de stele. În interiorul stelelor, aceasta conduce la o creştere a temperaturii, iar materia încălzită e supusă unei presiuni puternice, capabilă să reziste colapsului gravitaţional. De aceea stele precum Soarele nostru rămân stabile timp îndelungat – o şansă pentru supravieţuirea noastră.

Pe măsură ce stelele îmbătrânesc, ele îşi consumă hidro genul, inclusiv deuteriul. La un moment dat se declanşează reacţii ale heliului, fiindcă, la apropierea unui nucleu de hidro gen, nucleul de heliu poate primi un proton sau un

neutron. Astfel se formează elemente mai grele, cum sunt carbonul şi oxigenul, esenţiale vieţii pe Pământ, dar şi siliciul şi fierul, care alcătuiesc cea mai mare parte a planetei. În aceste reacţii e eliberată energie, care contribuie la radiaţia stelelor, dar nu atât de multă ca în cazul stelelor tinere. Cele mai stabile nuclee sunt nucleele de fier şi nichel, la care se opreşte fuziunea; nuclee mai grele decât acestea sunt produse doar în cantităţi mici. (Majoritatea elementelor grele care se găsesc în mod natural pe Pământ apar în urma exploziilor stelare violente, şi nu în reacţiile normale de fuziune, adăugând rapid protoni şi neutroni fierului.)

În aceste procese repetate de nenumărate ori vreme de miliarde de ani, prima generaţie de stele a făurit o mare diversitate de elemente, mult mai mare decât în cursul neucleosintezei big bang. Când şi-au epuizat combustibilul nuclear, unele stele au explodat în supernove, răspândind elementele în spaţiu. După mult timp, praful stelar s-a adunat iarăşi în nori, la fel ca hidrogenul iniţial, şi au început din nou să se formeze centri de densitate. Din aceste regiuni dense, într-o generaţie ulterioară de stele, s-a format sistemul nostru solar cu planetele lui, între care Pământul,

Piticele albe: Reci şi compacte

Când combustibilul nuclear este aproape epuizat, o stea nu mai străluceşte la fel de intens ca în cursul fuziunii hidrogenului. La început se dilată şi devine o gigantă roşie, continuând să strălucească un timp. Soarele va avea aceeaşi soartă peste vreo cinci miliarde de ani, înghiţind Pământul. Dar când tot combustibilul e consumat, apare din nou vechea problemă: gravitaţia comprimă nesăţioasă steaua, mult mai intens decât înaintea fazei de gigantă roşie. Ce forţă o poate contrabalansa pentru a rezulta un obiect stabil?

După epuizarea combustibilului nuclear, o stea uşoară se răceşte şi se contractă, până când presiunea materiei e suficientă pentru a se ajunge la o stabilizare asemănătoare cu cea a unei planete. Acest lucru nu e însă cu putinţă pentru stelele grele – prea multă masă le presează interiorul. Asemenea presiuni înalte nu pot fi obţinute în laborator, aşa încât comportamentul materiei în această stare nu e complet înţeles. Totuşi, pe baza fizicii cunoscute putem să ne facem o imagine generală despre evoluţia stelei.

La început, vine în ajutor mecanica cuantică, la fel cum a făcut-o deja pentru a stabiliza atomul de hidrogen. Ea conduce la un nou tip de forţă, greu de intuit, capabilă să reziste gravitaţiei. După cum am văzut, respingerea electrică n-a izbutit să facă faţă unor asemenea densităţi uriaşe, dar există un alt motiv pentru care două particule de acelaşi fel (doi protoni, doi electroni sau chiar doi neutroni) trebuie să stea la distanţă una de alta. Acest lucru a fost înţeles pentru prima dată de Pauli, fiind formulat în principiul de excluziune, care i-a adus în 1945 Premiul Nobel pentru fizică. Termenul „principiu” arată că are o origine abstractă, dar

fenomenul e cât se poate de real, lucru dovedit nu doar de existenţa piticelor albe în univers, ci şi de numeroase experimente efectuate pe Pământ.

Ceea ce percepem ca presiune în materia obişnuită sau în interiorul stelelor obişnuite e provocat de ciocnirile atomilor sau moleculelor. O presiune înaltă înseamnă că atomii sau moleculele împing cu mai multă putere materia înconjurătoare, şi poate fi rezultatul creşterii temperaturii. La stelele care şi-nu consumat însă combustibilul nuclear, creşterea presiunii prin încălzire nu mai e cu putinţă, şi ele sunt condamnate să se eoni prime sub acţiunea gravitaţiei. Nucleele atomice, aparţinând acum unor elemente grele care nu mai pot fuziona, se apropie mult unul de altul, iar funcţiile lor de undă electronice se suprapun. Când nucleele sunt suficient de apropiate, electronii îşi pot schimba cu uşurinţă locul de pe orbita unui atom pe cea a atomului învecinat, prin urmare nu mai pot fi atribuiţi unui atom anume, şi avem de-a face cu un gaz electronic răspândit în întreaga materie densă. Gazul electronic apare la presiuni înalte când atomii sunt împinşi unul spre altul, dar şi în condiţii normale, în metale, unde e răspunzător pentru conductibilitatea electrică.

Într-un gaz electronic nu există ciocniri între electroni în sensul obişnuit, ci el se opune comprimării, comportându-se conform principiului de excluziune al lui Pauli – particulele sunt ţinute la distanţă doar de mecanica cuantică. Pentru particule cum sunt electronii, protonii şi neutronii, două funcţii de undă de acelaşi tip – două funcţii de undă electronice, să zicem nu pot ocupa aceeaşi poziţie. Dacă am avea de-a face cu particule clasice punctiforme n-ar fi nicio problemă, fiindcă n-au extindere spaţială, dar în mecanica cuantică funcţia de undă are extindere spaţială, iar conform principiului de excluziune care spune că două funcţii de undă nu pot fi în acelaşi loc, electronii

trebuie să se respingă unul pe altul. Aceasta se întâmplă când funcţiile de undă se apropie prea mult, adică în general la comprimări puternice.

O asemenea forţă acţionează abia când materia a atins un grad înalt de colapsare. Obiectul stabilizat prin această stranie forţă cuantică e foarte mic – o pitică albă, un obiect compact, creat prin comprimare gravitaţională după ce aproape tot combustibilul nuclear a fost consumat. Nu mai au loc reacţii nucleare în interior, şi nu mai e nevoie de o temperatură înaltă pentru stabilizare. Oricât de stranii ar părea, asemenea obiecte sunt destul de răspândite: distanţa medie dintre ele este de aproximativ 10 ani-lumină în Calea-Lactee, în comparaţie cu diametrul galaxiei de 100.000 ani-lumină. Domeniul maselor lor se întinde între o miime din masa solară şi o masă solară şi jumătate, comprimarea fiind puternică, ele sunt foarte mici, sub dimensiunea planetei Jupiter.

Stele neutronice: Ultima revoltă

Este oare pitica albă ultimul răspuns stabil la gravitaţie? După cum sugerează limita superioară de o masă solară şi jumătate, lucrurile nu stau aşa. Reacţiile nucleare fac inaplicabil principiul lui Pauli dacă masa stelei muribunde depăşeşte această limită, numită limita Chandrasekhar, după fizicianul Subramanyan Chandrasekhar, care a primit în 1983 Premiul Nobel. Când o masă mare de materie e comprimată într-o stea, electronii şi protonii se apropie foarte mult. (Principiul de excluziune nu se aplică particulelor de tip diferit.) Dacă distanţa dintre ei e suficient de mică, apare o reacţie asemănătoare cu cea a fuziunii dintre doi protoni. Într-o ordine oarecum inversă, procesul e observat şi în dezintegrarea beta a elementelor radioactive, în care un neutron se dezintegrează într-un proton. În cazul nostru, electronul şi protonul reacţionează, rezultând un neutron şi un neutrin, iar cum acesta din urmă interacţionează slab cu materia, părăseşte steaua imediat. Stelele neutronice îşi datorează existenţa acestei ultime revolte a materiei împotriva gravitaţiei.

În condiţii normale, această dezintegrare beta inversă e în principiu posibilă, dar neutronul se dezintegrează într-un proton şi un electron (plus un antineutrin) după doar un sfert de oră. Neutronul e mai greu decât cele două particule luate împreuna şi are deci nevoie de mai multă energie pentru a fi stabilizat. Într-o stea foarte densă, colapsul gravitaţional oferă tocmai energia necesară stabilizării neutronului. Şi nu numai un neutron stabilizat – toţi protonii şi electronii din interiorul stelei se pot combina cu uşurinţă pentru a deveni neutroni. Şi de data aceasta o particulă, neutronul, ocupă mai puţin spaţiu decât un proton şi un

neutron luaţi împreună, altfel încât, după reacţie, steaua poate colapsa mai departe, eliberând energie.

Aceasta se întâmplă printr-o explozie. Brusc, regiunea centrală a stelei colapsează, cu emisia unei cantităţi imense de energie, însoţită de ejectarea noilor neutrini – greu de detectat dar de energie înaltă. Mari părţi din regiunea externă a stelei, simpli pioni în jocul violent al proceselor interne, sunt azvârlite în spaţiu când impactul dintre materia externă ce colapsează şi miezul neutronic dur proaspăt format produce o undă de şoc care se propagă în exterior. Asemenea explozii, sfârşit grandios al vieţii active a stelelor, sunt vizibile pe cer – acestea sunt supernovele de tipul II (sau Ic, dacă în straturile externe nu rămâne hidrogen). Ele trebuie deosebite de supernovele Ia, despre care am vorbit în capitolul precedent şi care sunt provocate de diferite tipuri de explozii termonucleare ale piticelor albe.

Ceea ce rămâne în miezul stelei este o materie încă mai neobişnuită decât cea din piticele albe: aproape numai neutroni. Nicio forţă electrică nu acţionează, fiindcă toate particulele sunt neutre. Singura forţă stabilizatoare e respingerea cuantică a neutronilor, bazată din nou pe principiul lui Pauli, căreia nu-i pasă de absenţa sarcinilor electrice. În comparaţie cu o pitică albă, o stea neutronică e şi mai densă, deoarece din două particule încărcate electric, un electron şi un proton, s-a format o singură particulă neutră, neutronul. Funcţia de undă a tuturor neutronilor ocupă deci mai puţin spaţiu decât ocupaseră înainte cele ale electronilor şi protonilor. Neutronii pot fi comprimaţi şi mai mult, aşa încât densitatea stelelor neutronice ajunge să fie de peste un bilion de tone pe metru cub. O stea neutronică poate avea o masă de două ori mai mare decât Soarele, dar o rază de doar zece kilometri. La suprafaţa ei,

gravitaţia e atât de puternică, încât uneori nucleele sunt deformate de forţe mareice.

Stele neutronice nu emit prea multă energie după ce supernova se stinge, dar le putem detecta doar datorită atracţiei lor gravitaţionale. Se întâmplă adesea ca o stea neutronică să se apropie de o stea obişnuită şi să orbiteze una în jurul celeilalte, iar din mişcarea stelei vizibile poate fi dedusă masa stelei neutronice. Stelele neutronice joacă de asemenea un rol important pentru pulsari sau pentru testarea relativităţii generale, după cum am văzut deja. Existenţa acestor obiecte e confirmată fără tăgadă, şi ele rămân stabile timp îndelungat.

Reuşeşte materia dură alcătuită doar din neutroni să reziste oricărei gravitaţii? Nu, căci şi în acest caz există o limită a forţei cuantice. Dacă steaua neutronică e suficient de grea – aproximativ două mase solare –, respingerea lui Pauli e învinsă. Valoarea exactă a limitei superioare e mult mai greu de determinat decât în cazul piticelor albe, fiindcă materia neutronică e mult mai puţin cunoscută decât materia densă a piticelor albe. Din fericire însă putem face calcule în cadrul relativităţii generale, iar acestea arată clar că toate forţele din materie sunt învinse în stele suficient de masive. Generalitatea acestei afirmaţii, independentă de forma materiei, subliniază încă o dată eleganţa relativităţii Când şi acest ultim zăgaz e rupt, nimic numai poate împiedica materia să colapseze sub acţiunea gravitaţiei. Nicio lege cunoscută a fizicii materiei nu mai poate juca vreun rol. Într-un asemenea grad de comprimare a materiei, ne-am putea aştepta să acţioneze legi necunoscute pentru a se ajunge la noi obiecte stelare stabile, dar nimic de acest gen n-a fost găsit, iar în cele din urmă materia nu poate sub nicio formă rezista gravitaţiei, în schimb, ceea ce găsim în universul real şi în soluţiile relativităţii

generale sunt găuri negre – etapele finale în colapsul total al materiei.

Singularitatea centrală:
Un înspăimântător punct în timp

Nimeni nu vede moartea,
Nimeni nu vede chipul morţii,
Nimeni nu aude glasul morţii,
Atât de sălbatică e moartea care-i sfârtecă pe oameni.

Epopeea lui Ghilgameş

Conceptul de gaură neagră, aşa cum a apărut el din soluţiile relativităţii generale, poate descrie numeroase proprietăţi astrofizice ale regiunilor dense. Este de neevitat, căci obiecte extrem de compacte, cu mase depăşind cu mult limita maximă a stelelor neutronice, există într-adevăr în univers. În centrul galaxiei noastre, de pildă, se află o masă compactă numită Sagittarius A*, cu o masă de trei milioane de ori mai mare decât cea a Soarelui, dar a cărei dimensiune nu poate fi măsurată de pe Pământ. Un asemenea monstru nu poate fi decât o gaură neagră gigantică.

Considerând spaţiul-timp conform relativităţii generale, ecuaţiile ei clasice ne arată că toată materia dintr-o gaură neagră colapsează într-un singur punct. La fel ca la big bang, avem de-a face cu o singularitate de densitate infinită, astfel încât ecuaţiile teoriei îşi pierd valabilitatea. Trebuie deci găsită o teorie mai vastă pentru ca ecuaţiile să rămână valabile şi să descrie etapa finală a colapsului gravitaţional. Şi în acest caz, un candidat este gravitaţia cuantică. Încă înainte de colapsul final, găurile negre ale relativităţii generale prezintă însă proprietăţi diferite de cele ale stelelor neutronice. De pildă, singularitatea nu este im punct în spaţiu, aşa cum s-ar putea

presupune, ci un punct în timp. De aceste proprietăţi, atât de importante pentru înţelegerea găurilor negre, ne vom ocupa în continuare.

Orizonturi:
Punctul dincolo de care nu există cale de întoarcere

Atunci când materia a colapsat complet şi nicio forţă contracarând gravitaţia nu mai poate ţine separate particulele elementare, apare oare o gaură neagră ca un singur punct în spaţiu, infinit de dens? Răspunsul e nu, din două motive: în etapa finală materia a colapsat complet, dar ciudăţeniile transformabilităţii spaţiului-timp din relativitatea generală nu fac ca aceasta să se întâmple într-un punct din spaţiu. Ar trebui să-l numim un „punct în timp", dar nici această denumire nu reflectă toate proprietăţile lui. Mai mult, nu putem vedea acest punct în timp din afara găurii negre; singularitatea colapsului materiei e învăluită de un orizont aflat la mare distanţă de ea. Doar proprietăţile acestui orizont şi ale zonei învecinate dezvăluie în exterior existenţa găurii negre. Deocamdată nu s-au făcut observaţii directe, dar peste vreo zece ani satelitul de observaţii Constellation-X e programat să exploreze spaţiul-timp din apropierea orizontului aflat în jurul unei găuri negre masive, prin detectarea radiaţiei X emise de acolo.

Toate aceste proprietăţi erau deja conţinute în soluţia găsită de Karl Schwarzschild pentru găurile negre care nu se rotesc, în 1916, la abia un an după publicarea relativităţii generale. Totuşi, singularitatea şi existenţa orizontului au fost pe deplin decodificate abia în anii 1960, odată cu o mai bună înţelegere geometrică a proprietăţilor spaţiului-timp. Einstein însuşi n-a crezut niciodată în realitatea singularităţilor care îi ameninţau teoria, ci, la fel ca majoritatea fizicienilor din vremea lui, se gândea că o singularitate apare doar

matematic, prin presupunerea simetriei totale, dar dispare în soluţiile mai realiste. (Einstein a subliniat de altfel în repetate rânduri că nu considera fundamentală relativitatea generală, ci se aştepta la completări ale ei venind din teoria cuantică şi din forma atomică a materiei.)

Într-o distribuţie a materiei perfect sferică, aşa cum e descrisă de soluţia lui Schwarzschild, colapsul poate avea loc doar central, către un punct unic. Acolo se va contopi întreaga materie, obţinându-se densităţi infinite. Am putea presupune că abaterile de la simetria sferică ale stelei iniţiale, corespunzând cazurilor realiste, conduc la colapsarea într-o regiune extinsă. Produsul final ar fi unul extrem de concentrat, dar nu singular. Numai că lucrurile nu stau aşa. Singularităţile apar mereu, iar ele trebuie considerate ca o ameninţare reală la adresa teoriei generale a relativităţii.[69]

Unele tehnici geometrice folosite la analiza acestor obiecte au o bază intuitivă. Ele decurg dintr-o construcţie a lui Roger Penrose numită completare conformă a spaţiului-timp. „Completare" înseamnă aici că se stabileşte o aplicaţie între tot spaţiul-timp care se extinde la infinit şi o regiune finită. „Conformă" înseamnă că aplicaţia, deşi comprimă spaţiul-timp în acea regiune finită, nu-l deformează prea puternic şi păstrează formele geometrice, mai cu seamă dimensiunile unghiurilor. Acest lucru e deosebit de important, fiindcă, după cum am văzut, unghiurile din spaţiu-timp trebuie interpretate nu numai spaţial, ci şi spaţio-temporal, ca viteze. Vitezele sunt de asemenea respectate – în particular, viteza luminii, care, viteză limită fiind, are o semnificaţie aparte.

În cazul soluţiei lui Schwarzschild simetrice la rotaţii, avem: avantajul de a considera doar două dintre cele patru dimensiuni spaţio-temporale: raza şi timpul. Simetria la rotaţii înseamnă că

proprietăţile spaţiului-timp, la fel ca cele ale unei sfere perfecte, nu depind de unghiul de orientare în jurul centrului. Cele două unghiuri necesare pentru a preciza o direcţie în spaţiu pot li deci ignorate. Aceste spaţii-timp pot fi vizualizate prin diagrame bidimensionale, şi nu cvadridimensionale; în combinaţie cu completarea conformă, ele poartă numele de diagrame Penrose. (În cazul soluţiei Schwarzschild, ele se mai numesc şi diagrame Kruskal, după numele lui Martin Kruskal, cel care a introdus coordonatele potrivite în 1960.)

Baza intuitivă a diagramei Penrose e următoarea: aşa cum se întâmplă deseori în astrofizică, studiul concret al găurilor negre e o problemă de împrăştiere. Gaura neagră nu emite propria ei lumină, iar radiaţia Hawking pornind din vecinătatea ei este prea slabă pentru a fi observată. Putem în schimb recunoaşte o gaură neagră prin lumina emisă de o stea, care, trecând prin apropierea ei, e deviată. La fel ca în cazul Lunii, putem „vedea" o gaură neagră şi determina proprietăţile ei prin radiaţia împrăştiată, cu toate complicaţiile legate de distanţa mare şi caracteristicile împrăştierii. (La urma urmei, gaura neagră n-are o suprafaţă distinctă, ci doar un orizont.)

Pentru a vizualiza gaura neagră în reprezentări bidimensionale, trasăm razele de lumină într-o diagramă spaţiu-timp (figura 20) conţinând raza şi timpul. Axa verticală este cea a timpului, iar cea orizontală e raza, prin definiţie pozitivă, deci toate punctele de pe axa verticală corespund centrului simetriei sferice. Ce se întâmplă când ne apropiem de această linie de-a lungul unei traiectorii? Linia nu e o frontieră a spaţiului-timp analogă singularităţii big bang, nimic neobişnuit nu se întâmplă aici; ea reprezintă numai o poziţie particulară. Când ne apropiem de centru (sau se apropie de centru razele de lumină), trecem (trec) pur şi simplu prin el, după cum se vede în figura

20. Centrul nu e un obiect fizic, deci nu poate influenţa materia sau lumina. Când ceva trece prin el, raza (distanţa la acel punct) se modifică: întâi scade, apoi creşte. În diagrama spaţiu-timp bidimensională, aceasta apare ca o „reflexie” a razei de lumină pe linia verticală, dar asta e doar o consecinţă a unei reprezentări care ignoră un ghiurile spaţiale.

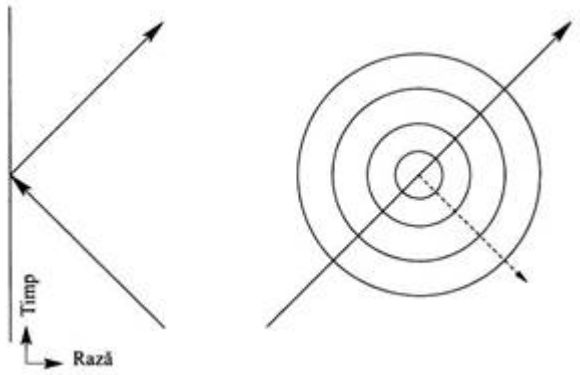


Figura 20. *Un spaţiu-timp simetric la rotaţii poate fi reprezentat într-un plan (în care coordonatele sunt timpul şi distanţa radială faţă de centru), mărginit ca urmare a faptului că raza e pozitivă. Razele de lumină se deplasează de-a lungul unei linii drepte, înclinate la 45°. Când lovesc frontiera, în această reprezentare sunt reflectate, căci ele traversează centrul astfel încât distanţa până la el întâi scade, apoi devine nulă, iar în cele din urmă creşte. În stânga: diagramă spaţio-temporală cu o rază trecând prin centru. În dreapta: diagramă spaţială a aceleiaşi situaţii.*

Avem astfel primele ingrediente ale diagramelor Penrose: o linie verticală, reprezentând comportamentul în timp al centrului, şi raze de lumină. Din moment ce lumina în spaţiul gol are mereu aceeaşi viteză, ca unghi spaţio-temporal neschimbat de aplicaţia conformă, fixăm pentru totdeauna direcţia razelor de lumină la 45°, spre stânga sau spre dreapta, după cum lumina se deplasează de la distanţe radiale mari la distanţe radiale mici, sau invers. Ne putem închipui că aceste raze de lumină vin de la infinit şi se întorc după ce au traversat centrul. În dreapta, nu e

nevoie de linii de frontieră, dar mărginirea vine din acea „completare” a spaţiului-timp într-o regiune finită, aşa încât reprezentăm un spaţiu-timp gol ca un triunghi isoscel, cu dreapta verticală a centrului ca frontieră, celelalte două laturi fiind originile şi destinaţiile, devenite acum finite, ale razelor de lumină incidente, respectiv emergente, după cum se vede în figura 21.

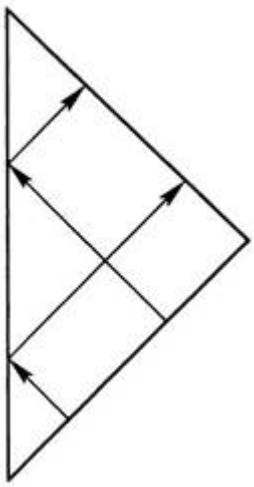


Figura 21. *Diagramă spaţio-temporală completă, cu două raze de lumină. Venind din trecut şi corespunzând unei distanţe arbitrare faţă de centru din dreapta jos, ele se apropie de verticala din stânga, traversează centrul şi se îndepărtează de el în viitor. Aceasta ilustrează o problemă de împrăştiere: lumina e emisă de o sursă din dreapta jos şi e detectată în dreapta sus. Atât sursa de lumină, cât şi detectorul se deplasează în timp în sus de-a lungul frontierelor. Diagrama înfăţişează o întreagă istorie a evenimentelor de emisie şi detecţie. Faptul că liniile surselor şi detectorilor se intersectează cu frontiera verticală, părând că provin din centru sau cad în el, este un efect secundar al procedurii de completare. Aşa cum la desenele în perspectivă liniile paralele par să se intersecteze în punctele de fugă, punctele în care se intersectează dreptele care mărginesc completarea conformă nu există în realitate, ci se află la infinit.*

Rezultatul e o diagramă completă bidimensională a spaţiului timp în care se propagă doar raze de lumină. (Ignorând unghiurile spaţiale,

putem desena în diagramă numai raze de luminii care trec prin centru, ceea ce e de ajuns pentru o înţelegere a spaţiului-timp şi a proprietăţilor sale de împrăştiere.) Spaţiul gol nu e prea interesant, dar putem adăuga alte elemente pentru a descrie corpurile sferice din astrofizică, iar atunci liniile înclinate la 45° corespund problemei de împrăştiere care reprezintă observaţiile astronomice.

Oricât ar părea de surprinzător, un obiect compact aflat în centru, de pildă o lună, nu apare mult diferit de spaţiul gol. Obiectul are o anumită rază, aşa încât trebuie să deplasăm traiectoria lui în timp undeva la dreapta frontierei din stânga (vezi figura 22). Raza lunii e constantă, suprafaţa trebuie să fie la o distanţă fixă de centru, la marginea din stânga. Dar, spre deosebire de unghiuri, distanţele nu sunt respectate prin aplicaţia conformă, aşa încât suprafaţa e reprezentată în diagramele conforme printr-o linie curbă. În felul acesta e împiedicată intersecţia suprafeţei cu cele două margini din dreapta (cu excepţia colţurilor), la care se presupune că ajung doar razele de lumină.

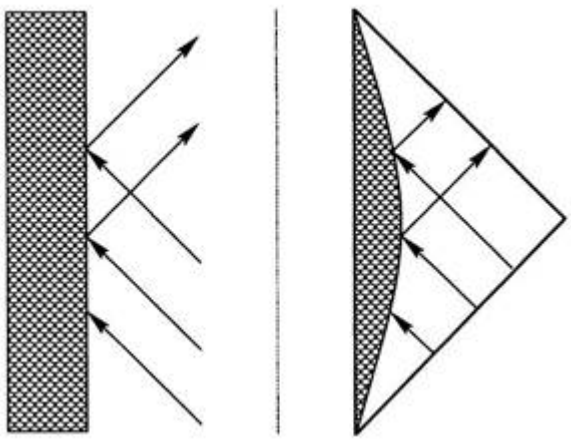


Figura 22. *Diagramă spaţio-temporală a lunii cu trei raze, prima fiind absorbită, celelalte două, reflectate. În dreapta, apare întregul spaţiu-timp în completarea lui. Marginile din dreapta corespund razelor infinite în trecut şi în viitor – originea şi destinaţia luminii incidente.*

Pe linia curbă, la fel ca în cazul suprafeţei lunii, o parte din lumina venind din dreapta e absorbită, iar restul e reflectată într-un sens cu adevărat fizic. Singura deosebire faţă de spaţiul gol este că unele raze de lumină se opresc – lucru pe care îl putem ignora, pentru că razele care se pierd sunt irelevante în problema împrăştierii –, iar celelalte sunt trimise înapoi spre dreapta în poziţii diferite. Din această perspectivă, toate obiectele compacte din astrofizică abia dacă pot fi deosebite de spaţiul gol, după cum se vede din compararea figurii 21 cu partea dreaptă a figurii 22. Această reprezentare foarte generală ar putea părea un dezavantaj, dat fiind că între observaţiile tuturor acestor obiecte există mari deosebiri. Asemănarea acestor imagini – radical diferite de cea a unei găuri negre, după cum vom vedea imediat – demonstrează însă proprietăţile ieşite din comun ale găurilor negre şi efectele lor puternice asupra spatului şi timpului.

Aplicate unei găuri negre, diagramele lui Penrose îşi dovedesc adevărata lor importanţă. Ne aşteptăm ca linia verticală a centrului să devină o frontieră reală a spaţiului-timp: singularitatea centrală. Aceasta e una din posibilităţi, care se realizează într-adevăr pentru unele soluţii ale relativităţii generale. Acele soluţii nu sunt însă importante în astrofizică, fiindcă o gaură neagră ce apare în colapsul gravitaţional al unei stele conduce la o altă diagramă. Calculele ne arată că singularitatea continuă linia verticală a centrului, dar nu pe verticală, ci pe orizontală, aşa cum se vede în figura 23. Nu e de tip temporal – nu e un punct fix în care timpul poate varia – ci de tip spaţial, o parte a spaţiului la un timp fixat. La urma urmei, poziţia verticalii determinând timpul, nu se modifică de-a lungul singularităţii De aceea, presupunerea noastră iniţială că singularitatea e un punct în spaţiu, se dovedeşte a fi incorectă. Un asemenea punct în spaţiu, vizibil în toate momentele de timp, ar fi pe verticală în diagrama

noastră, la fel ca linia centrului. Fiind însă pe orizontală, singularitatea ocupă mai multe puncte spaţiale, din o face la un moment de timp fixat – la un punct fixat în timp Colapsarea într-un punct, în reprezentarea spaţio-temporală, e de aşteptat să fie desenată extins, nu punctiform, fiindcă pune tul persistă în timp. Singularitatea, ca stare finală a colapsului este într-adevăr o linie extinsă în diagrama Penrose – dar, cum procesul e combinat cu o transformare spaţio-temporală în interiorul găurii negre, extinderea se manifestă în spaţiu, iar în timp e de natură punctiformă, şi nu invers.

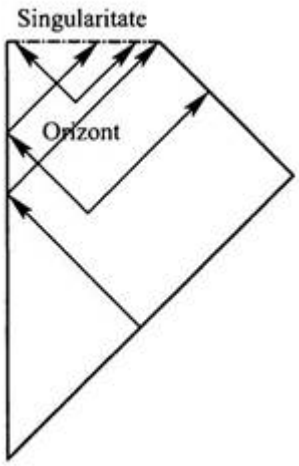


Figura 23. *Diagramă spaţio-temporală a unei găuri negre: singularitatea (reprezentată printr-o linie punctată) e o margine suplimentară. Nu toate razele de lumină pot evada spre marginea din dreapta sus. Există o rază de lumină (venind din dreapta jos) care poate la limită evada şi care marchează orizon tul prin segmentul ultim care porneşte de la linia centrală. Razele de lumină care pornesc în orice direcţie din interiorul orizontului (deasupra segmentului ultim al razei care evadează la limită) ajung mereu la singularitate, chiar dacă se îndepărtează de centrul de rotaţie. Razele de lumină care pornesc din afara orizontului şi se îndepărtează de centru reuşesc să evadeze.*

În relativitatea generală, noua linie orizontală reprezintă cu adevărat o frontieră: aici curbura spaţiului-timp e infinită, iar la fel este densitatea materiei prăbuşite acolo pentru a forma gaura

neagră. Acesta e punctul (în timp) unde materia colapsează total. Ecuaţiile relativităţii generale ne pot spune ceva despre forma singularităţii – şi anume că e un punct în timp –, dar nu ne duc mai departe. Nu ne sunt de vreun folos pentru a explora posibilitatea unui spaţiu-timp deasupra liniei orizontale, odată ce infiniţii fac ca toate ecuaţiile să-şi piardă semnificaţia matematică. Despre materia colapsată, în care s-ar putea afla şi vreun observator ghinionist sau sacrificat, nu putem spune decât că va atinge frontiera după un timp finit, iar apoi, conform teoriei, va înceta să existe. Dacă limita existenţei teoretice e şi o limită reală – aceasta e o altă întrebare, la care se poate răspunde doar într-o teorie mai generală, cum ar fi gravitaţia cuantică.

Pentru că e un punct în timp, singularitatea nu-i apare observatorului care se apropie de ea ca o pată strălucitoare. Dacă aşa ar fi stat lucrurile, lumina ar fi trebuit să pornească de acolo pentru a ajunge la observator, deplasându-se în sus pe diagramă, în regiunea unde relativitatea generală nu acceptă existenţa unui spaţiu-timp prin care să se propage lumina. Singularitatea e radical diferită de toate celelalte obiecte astrofizice, iar asta nu doar din cauza densităţii sale extrem de ridicate: natura sa de tip spaţial face ca ea să se formeze abia în momentul când un observator cade înăuntru.

Dar oricât de ciudat ar părea, singularitatea îşi face simţită prezenţa mai devreme: în vecinătatea ei – înţeleasă în sens temporal, înainte de a se forma – curbura spaţiului-timp e foarte mare, chiar dacă ea devine infinită doar în singularitate. Aşa cum am văzut în capitolul 1, o curbură puternică înseamnă că intensitatea şi direcţia forţei gravitaţionale variază mult pe distanţe scurte. Fiecare obiect extins, de pildă o capsulă spaţială, e supus unor forţe de întindere atunci când la capetele lui acţionează forţe diferite care trag în

direcţii opuse. Asemenea forţe se numesc *mareice*, prin analogie cu efectul mai slab al acţiunii gravitaţionale conjugate a Pământului şi a Lunii, care produce mareele. Observăm existenţa singularităţii cu mult înainte de a cădea în ea datorită acestor forţe; obiectele sunt dezmembrate la începutul apropierii de ea.

Apariţia singularităţii pentru un observator care a căzut în gaura neagră şi nu mai poate scăpa e înspăimântătoare, dar cum e resimţită gaura neagră de un observator din afară? Porţiunea de spaţiu-timp conţinând gaura neagră trebuie împărţită în două regiuni: o zonă triunghiulară de sub linia orizontală a singularităţii (figura 23), din care nimic nu poate evada, şi restul spaţiului-timp, unde ne putem aşeza ca observatori externi. Fiindcă nici măcar lumina nu poate evada – ea se poate deplasa doar pe dreptele înclinate la 45°, care sfârşesc toate pe singularitate, considerăm că linia de separare a celor două zone e frontiera găurii negre sau orizontul ei.

Orizontul are câteva proprietăţi importante. În primul rând, el se află la distanţă destul de mare (foarte mare, pentru găurile negre masive) de singularitate, cu excepţia punctului de la capăt, din viitorul îndepărtat. O gaură neagră de un milion de mase solare (care poate fi întâlnită în centrele galaxiilor) ar fi cam de dimensiunea Soarelui, iar distanţa de la orizont la singularitate – aşa-numita rază Schwarzschild – ar reprezenta o milionime din raza Soarelui (care e de aproximativ 700.000 km). Pentru stelele obişnuite, raportul dintre raza lor actuală şi raza Schwarzschild e de acelaşi ordin de mărime. La piticele albe, raza Schwarzschild e de aproximativ zece mii de ori mai mică decât raza lor, deci mult mai mare decât în cazul Soarelui, datorită mult mai puternicei lor comprimări.

Stelele neutronice extrem de dense au o rază doar cu puţin mai mare decât raza Schwarzschild determinată de masa lor. Ele se află la limita

colapsării într-o gaură neagră. Dacă ar fi puţin mai dense, suprafaţa lor s-ar afla sub orizont şi ar fi atrasă în singularitate. La găurile negre mai grele, raza lor creşte proporţional cu masa, iar orizontul se află atât de departe de regiunea puternic curbată din vecinătatea singularităţii, încât curbura spaţiului-timp din jurul orizontului e destul de slabă. În acest caz, nu e nevoie de gravitaţia cuantică pentru a înţelege proprietăţile găuri lor negre – dar e nevoie de o teorie cuantică a materiei pentru a explica efectul Hawking.

Curbura mică face ca, la început, să nu observi când ai trecut de orizont. În vecinătatea unui observator care cade într-o asemenea gaură neagră, spaţiul-timp nu diferă mult de cel din exterior. Un observator din exterior şi-ar da seama însă de prezenţa orizontului fiindcă semnalele emise de observatorul care cade ajung la el după tot mai mult timp (timpul se scurge mai încet într-o regiune cu gravitaţie intensă). Dacă cel care cade transmite semnale regulat, cel din afară poate determina momentul când trecerea orizontului e iminentă.

Acest comportament e relevant nu doar pentru un experiment imaginar în vecinătatea unei găuri negre, ci şi pentru observaţiile astronomice. De fapt, lumina e un asemenea semnal regulat. Dacă în vecinătatea orizontului există stele sau gaz incandescent, ca în cazul centrului Căii-Lactee, putem observa întârzierile în periodicitate sub forma schimbării culorilor: *deplasarea spre roşu* (scăderea frecvenţei). Pe asemenea efecte se bazează observaţiile proiectate pentru viitor asupra zonelor din vecinătatea orizonturilor găurilor negre.

Orizontul şi semnificaţia lui au fost înţelese abia relativ recent, la multă vreme după ce Schwarzschild a găsit soluţia care-i poartă numele. Lucrurile au fost îngreunate de faptul că apar infiniţi chiar şi la orizont, dar aceştia s-au dovedit

a nu fi dezastruoşi pentru spaţiu-timp. Ceea ce diverge aici e deplasarea spre roşu, aşa cum e ea măsurată de un observator extern: seni naiul periodic al unei surse care ajunge la orizont e infinit deplasat spre roşu. Privit din afară, semnalul nu se mai schimbă în timp. Dacă departe de gaura neagră, sub acţiunea unei gravitaţii slabe, timpul se scurge normal, procese din vecinătatea orizontului apar întârziate. Lumina însăşi e influenţată în apropierea orizontului, ieşind în mare măsură din spectrul vizibil atunci când ajunge la observatorul extern, prin urmare, pălind. Dar infiniţii apar doar din perspectiva observatorului, ei nu se leagă de vreo proprietate fizică a vreunui obiect sau a spaţiului-timp. Asemenea infiniţi sunt acceptabili, însă trebuie trataţi cu atenţie.

Toate acestea conduc la dificultăţi atunci când încercăm să descriem întregul spaţiu-timp prin coordonate, aşa cum pe Pământ folosim latitudinea şi longitudinea. În spaţiile curbe nu-i uşor să alegi coordonate globale, lucru valabil şi în cazul Pământului. La poli, longitudinea îşi pierde sensul: toate meridianele se intersectează. Asemenea puncte, în care unele dintre coordonatele alese îşi pierd semnificaţia, se numesc *singularităţi de coordonate.* Matematic, ele apar singulare şi, dacă nu eşti atent, pot conduce la infiniţi în calcule, dar, fizic, nu se întâmplă acolo nimic de neînţeles.

În paranteză fie spus, Polul Nord e deseori comparat în mod greşit cu o singularitate fizică, ceea ce i-a făcut pe unii să spună că n-are sens să vorbeşti despre ce-a fost „înainte de big bang” (sau, în cazul nostru, „înainte de gaura neagră”), aşa cum n-are sens să spui „la nord de Polul Nord”. Se creează aici o confuzie, fiindcă Polul Nord e doar o singularitate de coordonate, în timp ce singularitatea big bang şi cea a unei găuri negre sunt singularităţi reale, fizice: acolo, curbura creşte nelimitat, iar odată cu ea mărimi precum temperatura sau forţele mareice. Acolo eşti

literalmente dezmembrat; la Polul Nord, în cel mai rău caz mori de frig.[70] (Iar asta doar pentru că în mod convenţional Polul Nord se află în Arctica sau pentru că am folosit în orientare axa de rotaţie a Pământului.)

Un exemplu simplu de singularitate de coordonate poate fi găsit pe un cerc. Drept coordonată e de-ajuns un singur unghi, dar există mereu un punct în care unghiul trebuie să sară de la 360° înapoi la 0°. Aceasta se întâmplă pentru că cercul e ciclic, în timp ce noi folosim drept coordonate numere neperiodice. Se ajunge la un salt abrupt al coordonatei – o singularitate de coordonate, dar nimic mai mult. O furnică ce se deplasează de-a lungul cercului intră într-o noua tură, fără să-i pese de saltul unghiului. Acelaşi lucru se întâmpla şi cu calendarul; cercul e aici orbita Pământului în jurul Soarelui, iar coordonatele – luni, zile, ore – sunt alese într-un mod mai complicat, deşi ar fi fost de-ajuns un singur unghi. Şi în cazul acesta are loc un salt, de la ora 24.00 din 31 decembrie la ora 0.00 din 1 ianuarie. Anul Nou nu-i decât o singularitate de coordonate.

O altă proprietate importantă a orizontului poate fi deja întrezărită din unele remarci anterioare: orizontul nu e o suprafaţă în sensul obişnuit, nu-i o suprafaţă spaţială care înconjoară un obiect voluminos. În fond, conform diagramei Penrose din figura 23, orizontul e o dreaptă înclinată la 45°, o rază de lumină! Niciun obiect masiv, nici măcar suprafaţa unuia nu poate sta pe această dreaptă în spaţiu-timp, E pur şi simplu imposibil să te aşezi pe acea linie şi apoi să ieşi în exterior. Odată ajuns pe orizont, nu mai e scăpare: un obiect material cade în interior, iar apoi în singularitate; chiar şi lumina, în cel mai bun caz, poate plana la nesfârşit pe frontieră, evitând să se îndrepte spre singularitate, dar nu se poate întoarce în exterior – cel puţin conform relativităţii generale clasice.

Singularităţi nude şi cenzura cosmică:
Lege şi decenţă

După cum se vede în figura 23, singularitatea unei găuri negre formate prin colaps e un punct în timp, nu în spaţiu: în diagrama Penrose o linie orizontală, iar nu verticală. Există şi alte soluţii în relativitatea generală, de asemenea simetrice la rotaţii, în care marginea stângă a diagramei (sau o parte din ea) e singulară. Se poate întâmpla atunci ca o parte a acestei singularităţi să nu fie acoperită de un orizont. Uneori, nu există niciun orizont care să învăluie o singularitate, ca în exemplul din figura 24. Aceste aşa-numite singularităţi nude i-au tulburat atât de mult pe unii fizicieni, încât au introdus noţiunea de *cenzură cosmică.* Se presupune că asemenea singularităţi apar prin colaps gravitaţional doar în condiţii cu totul speciale, prin urmare nu joacă niciun rol în univers, fiind doar posibilităţi matematice rupte de realitate.

Această conjectură are o bază solidă: dacă ar exista o singularitate descoperită, lumina, şi nu numai ea, ar putea ajunge de acolo la noi. Din perspectiva relativităţii generale, care îşi încetează valabilitatea în singularitate şi nu ne poate spune nimic despre ea, orice se poate întâmpla. Dar, dacă ceea ce se întâmplă acolo poate influenţa restul spaţiului-timp, ştiinţa îşi pierde capacitatea de a prezice.

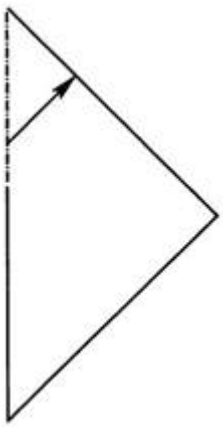


Figura 24. *Spaţiul-timp al unei singularităţi nude. În vreme ce partea continuă a dreptei verticale corespunde centrului, la fel ca înainte, o densitate infinită de materie apare în partea ei întreruptă. În relativitatea generală, această parte poate fi reprezentată doar ca o frontieră anarhic-singulară a spaţiului-timp. Din orice punct al ei, o rază de lumină poate evada spre marginea din dreapta sus; nu există deci un orizont care să acopere singularitatea. În singularitate, legile fizicii încetează să mai fie valabile. Ce se întâmplă acolo nu poate fi controlat. Mesaje sau influenţe ale anarhiei pot ajunge în afară, făcând imposibile predicţiile.*

Ceva asemănător are loc la singularitatea big bang, numai că noi ne-am obişnuit cu ideea de „început" al lumii. Dacă n-a existat nimic înainte de big bang, singularitatea trebuie să-şi fi pus amprenta asupra restului spaţiului-timp. Această tranziţie de la nimic la ceva nu poate fi explicată de relativitate, dar, odată acceptată, cel puţin evoluţia ulterioară e calculabilă. Chiar dacă big bang-ul nu e definit de relativitatea generală, el a avut loc în trecut şi e încheiat. Dimpotrivă, revoluţia unei singularităţi nude supravieţuieşte probabil pe veci. În fiecare clipă ne poate lovi imprevizibilul – o violare inacceptabilă a regulilor determinismului. Diferenţele dintre diversele tipuri de singularităţi apar limpede în diagramele Penrose; singularitatea big bang din figura 25 nu e la fel cu singularitatea nudă care se poate forma într-un colaps gravitaţional – dacă nu cumva e

cenzurată. La fel ca singularitatea unei găuri negre obişnuite, singularitatea big bang e un punct în timp: o dreaptă orizontală în diagrama Penrose. Dimpotrivă, o singularitate nudă e verticală.

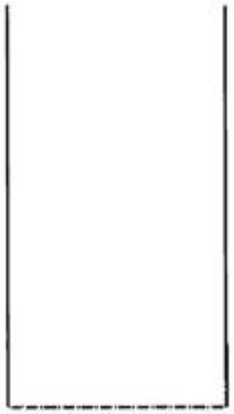


Figura 25. *Diagrama Penrose a unui univers care începe cu singularitatea big bang, reprezentată printr-o linie întreruptă la marginea de jos. Deşi nici această singularitate nu e acoperită de un orizont, ea e cu totul diferită de singularitatea nudă din figura 24: e o dreaptă orizontală, iar nu verticală. Diagrama nu e completată în partea de sus, fiindcă există mai multe posibilităţi pentru evoluţia viitoare. După cum am văzut în capitolul 1, în funcţie de materia pe care o conţine, universul poate fie să colapseze iarăşi într-o singularitate, caz în care diagrama se închide sus, fie să se extindă la nesfârşit.*

Conjectura cenzurii cosmice e importantă şi din perspectivă matematică. Există soluţii care îşi exhibă singularitatea nudă, dar ele sunt extrem de ruşinoase; în toate cazurile cunoscute s-a demonstrat că cea mai mică perturbaţie, o infimă modificare în starea iniţială a colapsului, duce la formarea unui orizont care acoperă totul – o adevărată cenzură. În general însă, cu toate eforturile matematicienilor şi fizicienilor, conjectura cenzurii cosmice n-a fost încă demonstrată, deşi a fost formulat A de Roger Penrose în 1969. Ea a stat la baza unor progrese im portante în matematică şi a rămas o mare problemă nerezolvată a relativităţii generale, pentru că se

referă la predictibilitatea a tot ce se întâmplă în spaţiu-timp.

Gravitaţie analogă: Găuri negre comune

Dacă e valabilă cenzura cosmică, atunci putem analiza găurile negre doar prin orizonturile lor. Deşi o investigare directă cu sonde e pesemne imposibilă, proprietăţile orizonturilor ar putea fi studiate în laborator. Nu ar fi studiat comportamentul spaţiului-timp, ci cel al materiei aflate în anumite medii care conduc la fenomene similare. Ideea i-a venit în 1981 lui Bill Unruh, căruia îi place să compare o gaură neagră cu o cascadă.[71] Dacă picăturile de apă cad suficient de repede, mai repede decât se propagă undele sau sunetul în apă, atunci un observator – de pildă, un peşte comunicând prin sonar – care se prăbuşeşte odată cu apa nu mai poate transmite semnale prin apă înapoi către unul aflat sus, în siguranţă. Putem deseori vedea acest lucru direct, după cum se arată în figura 26, căci turbulenţa care se formează la bază nu se poate propaga contra curentului sus, acolo unde apa rămâne liniştită. Cascadele repezi sunt cel mai simplu exemplu pentru a observa că fenomenele exotice ale spaţiului-timp din relativitatea generală au un analog în medii obişnuite cum sunt lichidele. Studiul fenomenelor geometrice cu mijloacele fizicii stării condensate se numeşte *gravitaţie analogă.* (Care, trebuie s-o spunem, nu e precursoarea „gravitaţiei digitale", cum s-ar putea crede.)

Deşi, în acest sens, un orizont poate fi cu uşurinţă produs, sunt interesante pentru experimentatori problemele mai subtile, legate de efectele cuantice – corespunzând, de pildă, în cazul găurilor negre, radiaţiei Hawking. În gravitaţia analogă cu medii materiale, cercetătorii au avantajul că efectele cuantice ale materiei au

fost deja intens studiate în alte scopuri. În locul undelor gravitaţionale – excitaţii ale spaţiului-timp care ajung la noi de la mari distanţe –, în materia condensată avem de-a face cu *fononi.* Aceştia sunt oscilaţii colective ale atomilor dintr-un solid sau dintr-un lichid, care, datorită consistenţei mediului, se propagă cu o anumită viteză. Prin forţele de legătură dintre ei, un grup de atomi care oscilează poate pune în oscilaţie şi atomii vecini.

Figura 26. *O cascadă ilustrează un orizont în care undele, ca semnale acustice în apă, nu se pot propaga în amonte. Aceasta se vede din faptul că sus apa rămâne liniştită, neperturbată de turbulenţa care se formează jos. În mod asemănător, există în jurul găurii negre un orizont din spatele căruia lumina nu mai poate evada. (Cascada Leura, Munţii Albaştri. Australia.)*

Din moment ce oscilaţiile unui singur atom sunt cuantificate, la fel sunt şi oscilaţiile colective. Intensitatea lor nu poate varia continuu, ci doar în paşi discreţi: sunt creaţi alţi fononi prin vibraţii atomice. Avem de-a face cu o reprezentare

cuantificată a sunetului, cam aşa cum fotonii ne dau o reprezentare cuantificată a luminii. Ne aşteptăm la ceva similar pentru undele gravitaţionale, dar, pentru o imagine completă, ar trebui să apelăm la gravitaţia cuantică. Deşi deocamdată nu e cunoscută structura lor, aceste excitaţii atomice ale spaţiului-timp au căpătat deja un nume: *gravitoni*. În gravitaţia cuantică cu bucle, imaginea finală ar putea semăna mult cu cea din fizica materiei condensate, fiindcă se presupune într-adevăr o structură cuantică discretă a spaţiului-timp. Odată înţelese matematic, excitaţiile acestuia ar trebui să conducă la gravitoni. Madhava Varadarajan a întreprins deja primele cercetări în direcţia asta.

Undele apărute din propagarea unei oscilaţii pot fi folosite pentru a transmite semnale, cu condiţia să fie generate în mod deliberat şi precis recepţionate. Pentru lumină şi sunet folosim văzul şi auzul. La nivel microscopic, fotonii de lumină sau fononii din aer sunt percepuţi şi interpretaţi în ansamblul lor ca semnale. Aceste particule de schimb au şi o semnificaţie fundamentală în înţelegerea fizicii, căci ele dau imaginea elementară a unei forţe. În cazul fononilor, această forţă e cea elastică: o deformare într-un solid sau o creştere a presiunii într-o zonă dintr-un lichid se propagă ca o undă din locul de formare şi afectează în cele din urmă regiuni îndepărtate. Deformaţiile şi variaţiile presiunii pot fi interpretate macroscopic, ignorând procesele elementare, ca acţiunea unei forţe.

În mod asemănător, fotonii sunt constituenţii elementari ai luminii; în cantităţi uriaşe, ei alcătuiesc semnalele complexe pe care le folosim adesea pentru a comunica. Lumina se propagă chiar şi în spaţiul gol; ceea ce transmit fotonii e pur şi simplu forţa electromagnetică. Gravitonii sunt consideraţi particulele de schimb elementare ale gravitaţiei. În ciuda formulării ei incomplete în

cadrul gravitaţiei cuantice, această idee prezintă un avantaj faţă de perspectiva newtoniană: ca mesageri, gravitonii trebuie întâi de toate să traverseze spaţiul gol dintre două locuri; forţa pe care o transmit nu poate acţiona instantaneu. O descriere consistentă a gravitonilor drept cuante ale gravitaţiei ar anula automat rezervele lui Newton în privinţa propriei sale formule.

Reprezentarea clasică a forţei în relativitatea generală se confruntă cu tot felul de dificultăţi şi paradoxuri aparente. Şi în acest caz, existenţa găurilor negre lămureşte problemele: gaura neagră e sursa unei forţe gravitaţionale intense prin care acţionează asupra maselor din vecinătate. Forţa e atât de mare, încât majoritatea galaxiilor sunt legate în discuri rotitoare de găuri negre gigantice aflate în centrele lor. Existenţa găurilor negre nu poate fi detectată decât prin influenţa lor asupra zonelor învecinate, fiindcă lumina nu poate evada. Dar, dacă gravitaţia nu e decât forţa transmisă prin schimbul de gravitoni, atunci de ce gravitonii, mesageri analogi fotonilor pentru lumină, părăsesc gaura neagră pentru a da de ştire în vecinătate de existenţa puternicei forţe din centru? Reconcilierea reprezentării elementare a cuantelor de gravitaţie cu procesele violente de curbare a spaţiului şi timpului e una dintre principalele dificultăţi ale gravitaţiei cuantice.

Dar să ne întoarcem la gravitaţia analogă. După cum am spus când am vorbit despre orizonturi, teoria cuantică explică emisia radiaţiei Hawking din vecinătatea unei găuri negre. În mod corespunzător, la orizontul unui mediu ne-am aştepta să avem de-a face cu un proces similar de creare a fononi lor. Din moment ce putem construi cu uşurinţă un orizont analog, iar fononii nu sunt decât unde acustice detectabile, testul e simplu de efectuat. Ralf Schiitzhold, de pildă, a propus recent asemenea experimente. Domeniul e unul de actualitate, contribuţii importante având de

asemenea Carlos Barcelo, Stefano Liberaţi, Mau Visser şi Silke Weinfurtner.

Deşi pare uşor, nu putem auzi pur şi simplu sunetul analogului radiaţiei Hawking, fiindcă nu e destul de intens. Mediul trebuie izolat de sursele externe, sarcină complicată de producerea unui orizont, a cărui existenţă presupune viteze mari în anumite părţi ale mediului. Ne punem speranţe în anumite forme exotice ale materiei, numite condensări Bose-Einstein, care apar în unele materiale la temperaturi extrem de scăzute. Ele au avantajul că viteza sunetului e foarte mică – viteze infime ale mediului sunt de ajuns pentru a confina undele sonore într-o regiune dată. În plus, acest tip de materie există la temperaturi mai joase decât cea a radiaţiei Hawking fononice. Dimpotrivă, la găurile negre din univers radiaţia Hawking e strălucitoare (sau, în termeni acustici, „se aude mai tare") decât radiaţia de fond produsă de temperatura mediului, astfel încât ar trebui să fie mai uşor de detectat.

Experimentele se află abia în stadiul de proiect, dar ele oferă şansa de a testa în laborator proprietăţile orizonturilor, înainte de a face experimente riscante asupra găurilor negre din spaţiu. Nu apar pericole, fiindcă nu există vreo singularitate, iar orizontul dispare automat atunci când lichidul intră în repaus. Dacă în felul acesta radiaţia Hawking analogă va putea fi confirmată şi măsurată cu precizie, va creşte încrederea în metodele matematice folosite pentru a o calcula. Apoi, există aspecte fundamentale ale radiaţiei Hawking care nu sunt complet înţelese, în loc să folosim matematica, ale cărei progrese în această direcţie au fost lente în ultimele decenii, prin măsurători am avea acces direct la natură.

Teoria cuantică a găurilor negre:
Să-l faci pe cel fără glas să vorbească

Găurile negre ridică o sumedenie de probleme în care teoria cuantică a materiei sau gravitaţia sunt de importanţă capitală, de pildă cele legate de regiunea orizontului sau de singularitatea finală a colapsului. În primul rând, trebuie să ne întrebăm ce este de fapt o gaură neagră, căci, din cauza singularităţii, relativitatea generală nu ne poate da o imagine completă.

Evoluţie cosmică? Naşterea lumilor

E limpede că găurile negre există în univers, ceea ce face şi mai şocant faptul că nu le înţelegem pe deplin. Problema nu *e* numai că nu ştim exact cu ce obiect astrofizic avem de-a face sau care e natura exploziilor de radiaţie gama. Găurile negre ne pun probleme de cu totul alt ordin; rămâne de aflat dacă ele sunt doar regiuni dense şi puternic curbate ale universului nostru, ca multe alte obiecte grele, sau procese de ramificare a spaţiului-timp prin care apare un univers-fiică. Întrebarea funda mentală este deci; marchează oare orizontul o regiune de tranziţie spre o lume diferită, accesibilă doar prin el, sau e numai o etapă de trecere spre o regiune din cadrul universului nostru?

Aceste două posibilităţi pot fi ilustrate prin diagrame Penrose, dacă le extindem grafic dincolo de linia orizontală a singularităţii. Acest lucru nu e posibil în cadrul relativităţii generale, fiindcă singularitatea e o frontieră, dar e util să aflăm ce posibilităţi se deschid, pentru a le putea apoi analiza în cadrul gravitaţiei cuantice. După cum se vede în figura 27, această regiune poate fi conectată la exteriorul vechii găuri negre, astfel încât gaura neagră n-ar reprezenta decât un nucleu extrem de dens. Sau ea ar putea fi deconectată, caz în care în spatele singularităţii s-ar deschide noua lume neaşteptată a unui univers-fiică. Gaura neagră ar fi atunci o poartă marcând bifurcaţia între universul-mamă şi universul-fiică şi ar avea un orizont care taie cordonul ombilical.

Cum anume se extinde imaginea clasică poate fi determinat doar prin mijloacele teoriei gravitaţiei cuantice, fiindcă ea guvernează (cel puţin aşa presupunem) toate evenimentele care au loc în

ceea ce apare în relativitatea generală drept singularitate. Problema rămâne deschisă, dar putem deja apela la unele proprietăţi ale teoriilor cuantice ale gravitaţiei pentru a face speculaţii; iar speculaţia cea mai tentantă este, desigur, posibilitatea menţionată mai sus: crearea unui univers-fiică.

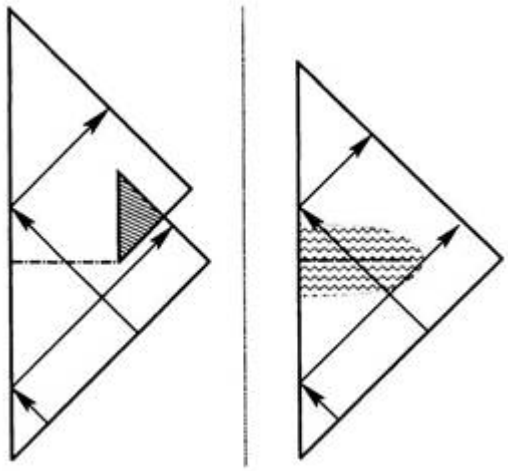


Figura 27. *Variantele unei găuri negre care evită singularitatea. În stânga: în spatele singularităţii există un univers-fiică fiară contact cu exteriorul găurii negre anterioare. (Regiunea haşurată marchează o suprapunere în reprezentarea noastră, dar nu există contact între cele două spaţii-timp.) În dreapta: singularitatea clasică e pur şi simplu înconjurată de o regiune cu o curbură puternică (marcată prin linii ondulate). În acest caz, diagrama nu diferă semnificativ de cea a unui obiect compact, ca în figura 22.*

Teoreticienii şi-au pus deseori această problemă, dar Lee Smolin, unul dintre fondatorii gravitaţiei cuantice cu bucle, a abordat-o cu o remarcabilă creativitate. El presupune că acest univers-fiică se dezvoltă pentru a deveni un univers mare, precum al nostru, care, la rândul lui, s-a născut la fel dintr-un univers-mamă. Asemenea naşteri sunt altceva decât ricoşeele din cosmologie – simple puncte de întoarcere în expansiunea unui univers unic. Prin găurile negre, un univers se poate la un moment dat despărţi în două, iar dacă fenomenul se repetă obţinem un spaţiu-timp puternic ramificat, cu o

structură extrem de complexă. Fiecare gaură neagră din cosmos poate da naştere propriilor sale universuri-fiică, iar fiecare univers-fiică poate genera, prin găurile negre pe care le conţine, universuri-nepoate şi aşa mai departe.

Altă diferenţă între naşterea universurilor şi ricoşeul cosmic ţine de faptul că o discuţie despre universurile-fiică necesită o perspectivă teoretică din afara spaţiului-timp. Ca observatori din interior (ceea ce şi suntem), nu putem alege decât între a rămâne în universul-mamă, în afara tuturor găurilor negre, sau a ne arunca într-unul dintre universurile-fiică, la alegere. Nu putem cuprinde întregul spaţiu-timp ca pe un obiect fizic observabil. Când vorbim despre universuri-fiică separate ne situăm pe o poziţie metafizică, în afara oricărei posibilităţi de observare. Ne-am confruntat deja în cosmologie cu mari dificultăţi pentru a întrezări universul dinainte de big bang, deşi acest lucru era măcar în principiu posibil. Să priveşti însă mai multe universuri fiică simultan este fundamental imposibil.

Aici intră în joc ideea revoluţionară a lui Smolin. El susţine că ar putea apărea totuşi consecinţe observabile ale acestor procese de ramificare repetată, iar pentru asta e nevoie de o ipoteză suplimentară: Ia fiecare separare, parametrii universului, cum sunt constantele naturii, se modifică uşor. Ea nu are un temei real, dar ar putea fi o consecinţă a gravitaţiei cuantice şi vom considera că e îndeplinită. (în teoria corzilor, multe „constante ale naturii” sunt date de valori ale câmpurilor care pot varia în intervale lungi de timp, ceea ce e compatibil cu ideea lui Smolin.)

Smolin susţine că avem de-a face cu un proces de evoluţie asemănător celui din biologic. Simplificând lucrurile, darwinismul ne spune că imensa varietate a vieţii pe Pământ a apărut printr-o evoluţie bazată pe două principii: mutaţie şi selecţie. *Mutaţia* înseamnă că progenitura se

deosebeşte puţin de părinţi; *selecţia* îi alege apoi pe indivizii cel mai bine înzestraţi pentru o anumită nişă şi îi elimină pe ceilalţi. Procesul nu e unul întâmplător: înzestrările favorabile sunt cele care îi dau individului şansa să aibă cât mai multe progenituri care ajung la maturitate, ceea ce asigură supravieţuirea „eului" său genetic după moartea sa.

Spaţiul-timp ar putea fi guvernat de principii asemănătoare. Dacă proprietăţile fiecărui univers-fiică sunt uşor modificate, avem de-a face cu o mutaţie. Şi selecţia intră în joc, fiindcă rata de reproducere prin găuri negre într-un univers-fiică e determinată de legile fizicii valabile în el. (Selecţia are aici un sens statistic, nu existenţial, deoarece universurile individuale nu pot intra direct în competiţie pentru resurse, ci concurează pentru dominaţia statistică a proprietăţilor lor în multitudinea tuturor universurilor-fiică.) De exemplu, limita Chandrasekhar, masa maximă a unei pitice albe, depinde de constantele naturii cum sunt constanta cuantică a lui Planck şi constanta gravitaţională a lui Newton. Când această limită e coborâtă prin modificarea constantelor, găurile negre se pot forma la mase mai mici. Universurile-fiică având valori ale parametrilor care conduc mai lesne la formarea găurilor negre vor avea mai mulţi urmaşi şi vor domina cosmosul metafizic. De aici rezultă o imagine a evoluţiei cosmice care ar putea explica diversitatea obiectelor şi fenomenelor din universul nostru, de la galaxii la exploziile de raze gama.

Propunerea lui Smolin are o trăsătură remarcabilă: e testabilă, cel puţin într-o manieră statistică, ceea ce îi conferă caracter ştiinţific. În privinţa asta se deosebeşte de alte versiuni ale aşa-numitelor *multiversuri,* conglomerate de regiuni spaţio-temporale separate între ele şi reciproc inaccesibile. Statistic vorbind, ar trebui la urma

urmei să ne aflăm într-o parte tipică a multiversului, într-un univers-fiică ce apare foarte frecvent. La fel ca în exemplul din biologie, universurile cele mai apte, cu cele mai multe progenituri, sunt cele mai răspândite. În acest scenariu, progeniturile apar prin găurile negre, punctele de ramificaţie ale multiversului în noi universuri-fiică. Dacă uni versul nostru e unul tipic, el ar trebui să producă numeroase găuri negre, ceea ce se pare că se şi întâmplă: majoritatea galaxiilor au în centrul lor găuri negre masive, iar în afara lor multe mai mici. Ne putem face o imagine cantitativă estimând caracteristicile pe care trebuie să le aibă constantele naturii pentru a produce numeroase găuri negre. Dacă, de pildă, constanta lui Newton ar fi prea mică şi gravitaţia prea slabă, atunci îngrămădirea materiei în universul timpuriu ar fi prea lentă, rămânând în univers doar un gaz răspândit pretutindeni. Sau poate că stelele neutronice ar rămâne stabile indiferent de masă, nepermiţând colapsul gravitaţional ulterior în găuri negre.

În principiu, am putea vedea dacă universul nostru e într-adevăr un competitor în concursul de fertilitate interuniversal, admiţând că numărul de găuri negre e măsura succesului. Calculele şi estimările statistice sunt însă dificile, iar puţinele rezultate obţinute până acum rămân discutabile. Oricum ar sta lucrurile, conjectura lui Smolin se bazează pe presupunerea că, în gravitaţia cuantică, singularitatea găurii negre e într-adevăr eliminată de ramificarea universului într-un univers-fiică – afirmaţie viu disputată. După secţiunea următoare ne vom întoarce la fizica cuantică a găurilor negre.

Radiaţia Hawking şi pierderea informaţiei:
Dispare totul în neant?

În drumul spre o teorie cuantică a găurilor negre avem nevoie mai întâi să cercetăm cu atenţie radiaţia Hawking. Deducerea ei nu se bazează pe vreo versiune a gravitaţiei cuantice, ci apelează la efectele cuantice ale materiei într-un univers curbat de transformările spaţio-temporale, dar necuantic. După cum se vede în figura 23, diagrama unei găuri negre are o formă cu totul diferită de cea a altor obiecte astrofizice din figura 22, sau de cea a spaţiului gol din figura 21. Diferenţele sunt evidente mai ales la orizont şi dincolo de el, în interiorul găurii negre; în apropierea orizontului avem o structură a spaţiului-timp foarte diferită de cea de la distanţe mari.

La fel ca în cazul fundului de mare care influenţează propagarea undelor sau în cel al creării materiei în vid, forma spaţiului-timp determină comportamentul funcţiei de undă cuantice a materiei. Funcţiile de undă cuantice sunt influenţate de fondul instabil al spaţiului-timp în apropierea orizontului, aşa încât undele parţiale reprezentând particule se despică. În termeni corpusculari, sunt create perechi particulă-antiparticulă, un partener căzând în gaura neagră, iar celălalt evadând sub formă de radiaţie Hawking.

Evadarea particulelor face ca masa şi energia găurii negre să scadă. Orizontul ei, a cărui rază e proporţională cu masa, se îngustează. Iniţial, procesul e extrem de lent fiindcă temperatura unei găuri negre grele e foarte scăzută şi se emite puţină energie. Orizontul unei găuri negre mari este

departe de singularitate; în vecinătatea orizontului, abaterile spaţiului-timp de la forma lui în spaţiul gol sunt mult mai mici decât pentru găurile negre uşoare. În analogia cu fundul mării, fondul din apropierea orizontului larg al unei găuri negre masive seamănă mai mult cu spaţiul gol decât cel din jurul orizontului strâmt al unei găuri negre uşoare; sunt create mai puţine unde sau particule.

Dacă nu cumva din afară cade mai multă energie decât e radiată prin efectul Hawking, raza orizontului continuă să scadă. Pentru găurile negre cu o masă obişnuită, cum sunt cele care pot fi întâlnite în univers, chiar şi slaba radiaţie cosmică de fond din prezent oferă suficientă energie ca să le stabilizeze împotriva evaporării Hawking. Dar, după ce universul se va mai dilata, radiaţia de fond se va răci şi va deveni mai slabă. Găurile negre uşoare vor începe să se evapore cândva în viitorul îndepărtat. Doar înghiţind materia din apropiere, stele sau gaz intergalactic, pot scăpa de evaporare, dar această „hrană" se va epuiza la un moment dat. Privind la scara întregii istorii a universului, procesul de evaporare a găurilor negre este deci unul realist.

Când începe să se evapore, gaura neagră se contractă şi se încălzeşte tot mai mult, ceea ce intensifică procesul de evaporare. Prin extrapolare, ajungem la concluzia că, după un timp finit, orizontul găurii negre ar trebui să dispară. Această extrapolare nu e însă valabilă, fiindcă, scăzând, orizontul se apropie de singularitate în regiunea de curbură puternică. În această etapă avem nevoie de o teorie cuantică a gravitaţiei, pe care Hawking n-o ia în considerare. În calculele sale, el s-a bazat pe relativitatea generală pentru a descrie gaura neagră şi orizontul ei, şi pe teoria cuantică a materiei în spaţiu-timp – dar nu pe aceea a spaţiului-timp însuşi.

De unul singur, procesul Hawking nu ne poate spune ce înseamnă de fapt singularitatea găurii

negre. Singularitatea nu dispare pur şi simplu în neant (sau într-o radiaţie palidă). De una singură, teoria cuantică a materiei nu ne poate oferi o soluţie la problema singularităţii. Totuşi, evaporarea dezvăluie dificultăţi ale perspectivei clasice care sunt utile pentru o rezolvare ulterioară în cadrul gravitaţiei cuantice.

Dintre aceste probleme, cea mai aprig disputată este aşa-numitul *paradox al pierderii informaţiei.* Tot felul de lucruri pot cădea într-o gaură neagră şi lua cu sine o cantitate imensă de informaţii. Ceea ce rezultă din procesul Hawking e însă doar radiaţia corpului negru din vecinătatea orizontului, care nu ne spune nimic despre conţinutul găurii negre. Această radiaţie este unul dintre cele mai anoste şi lipsite de informaţii lucruri din fizică.[72] E de-ajuns un singur parametru: temperatura. Dacă îl cunoşti, întregul profil al intensităţii radiaţiei e deja determinat – e forma dedusă de Planck atunci când, fără să-şi dea seama, a pus bazele mecanicii cuantice. Majoritatea radiaţiei e emisă într-un spectru de frecvenţe complet determinat de temperatură.

Găurile negre ar constitui deci un fel de maşină de distrus informaţia, ceea ce reprezintă o mare problemă în teoria cuantică. Deşi nu cunoaştem ecuaţiile exacte care descriu starea cuantică sau funcţia de undă a unei găuri negre, se poate demonstra că niciun fel de ecuaţii din teoria cuantică nu conduc la o asemenea distrugere a informaţiei. Nu numai că accesul la informaţie ar fi dificil, dar nici măcar în principiu ea nu poate fi reconstituită. Dacă o carte e arsă, informaţia pe care o conţine nu mai poate fi citită, însă, cu ajutorul unor tehnici sofisticate, ca poate fi totuşi recuperată din paginile carbonizate. Distrugerea informaţiei în găurile negre e totală: nu există niciun fel de purtător de informaţie prin care datele pierdute să fie salvate.

Problema devine pesemne mai limpede dacă o formulăm cu ajutorul cantităţilor care se conservă. În fizică, anumite numere ce caracterizează conţinutul total de materie din univers nu se pot schimba în cursul nici unui proces cunoscut. Un exemplu e energia, care e de asemenea constantă în procesul Hawking. Altele sunt sarcina electrică, numărul total de protoni, neutroni şi parteneri mai grei ai acestor particule, numit *numărul barionic.* Antiparticulele corespunzătoare lor sunt luate cu semnul minus, ceea ce face ca numărul total să rămână neschimbat la crearea perechilor particulă-antiparticulă, de pildă, proton-antiproton. Nimic nu ne împiedică însă să trimitem mai mulţi protoni decât antiprotoni într-o gaură neagră, ceea ce probabil că se întâmplă oricum, din moment ce în universul nostru există mult mai multă materie decât antimaterie. O gaură neagră ar conţine deci un surplus de protoni. Pe de altă parte, radiaţia Hawking tratează democratic materia şi antimateria: e la fel de probabil ca particula emisă aproape de orizont să fie particula sau antiparticula dintr-o pereche. (Sarcina electrică ar putea face distincţia între parteneri, favorizând atracţia sau repulsia, dar găurile negre nu sunt puternic încărcate electric.) Dacă gaura neagră s-ar evapora complet, lăsând în urmă doar particule Hawking, ar fi violată una dintre legile de conservare importante.

Problema poate fi rezolvată doar presupunând că rămâne un reziduu stabil al găurii negre la sfârşitul evaporării. Dar ce obiect ar putea fi acest reziduu şi de ce s-ar opri atunci evaporarea? Doar fenomenele gravitaţiei cuantice ne pot veni aici în ajutor, căci relativitatea generală nu prevede oprirea evaporării şi nici vreun reziduu. Odată ce materia a colapsat, teoria clasică admite doar posibilitatea evaporării până la capăt. Un nucleu compact rămas după evaporare ar putea fi explicat doar prin teoria cuantică a gravitaţiei. Dacă însă,

aşa cum e de aşteptat, gravitaţia cuantică devine relevantă abia la scara lungimii Planck. reziduul trebuie să fie minuscul. Se pune atunci întrebarea dacă, admiţând că e stabil, ar putea el adăposti o parte suficientă din informaţia înghiţită de gaura neagră pentru ca procesul să fie compatibil cu teoria cuantică.

La fel ca în cazul singularităţii big bang, nu putem eluda gravitaţia cuantică şi investigarea detaliilor sale. Ne confruntăm din nou cu problema timpului: spaţiul-timp are o margine care, în spatele orizontului, nu lasă suficient timp pentru ca, de pildă, lumina să evadeze. Un timp discret poate elimina singularitatea big bang, oferind un timp suplimentar în spatele ei; poate că şi în cazul găurilor negre aceasta ar fi soluţia salvatoare. În fond, singularitatea găurii negre, care e un punct în timp, seamănă cu cea din momentul big bang-ului – cu deosebirea că gaura neagră ocupă doar spaţiul unei regiuni limitate, nu întreg spaţiul. Dacă s-ar obţine mai mult timp, s-ar putea deschide o nouă regiune a spaţiului-timp: o nouă lume – fie un univers-fiică, fie o nouă parte a universului nostru, după evaporarea găurii negre – despre care relativitatea generală nu ne poate spune nimic.

Gravitaţia cuantică a găurilor negre:
Viaţa trebuie să continue

Dacă găurile negre emit energie, ele pot fi considerate un analog al atomilor excitaţi care, în mecanica cuantică, ne dezvăluie nivele discrete de energie. Atomii aflaţi într-o stare energetică deasupra celei fundamentale pot emite surplusul de energie, trecând în starea fundamentală. În mecanica cuantică, energia radiată, măsurată în spectrul de emisie al atomului, ne oferă informaţii despre structura atomului. În mod asemănător, găurile negre sunt sisteme legate gravitaţional, a căror radiaţie ne-ar putea da indicii privind structura lor. Ele emit prin procesul Hawking energie, care nu e deocamdată măsurată, dar poate fi calculată. În studiul radiaţiei Hawking facem apel la relativitatea generală şi la teoria cuantică a materiei, iar rezultatul nu e pe deplin compatibil cu cele două teorii, din cauza problemei pierderii informaţiei. În particular, starea finală de după evaporarea Hawking nu poate fi înţeleasă în felul acesta. Ea pare să fie analogul stării fundamentale a atomului, şi ar putea fi descrisă doar cu mijloacele unei teorii cuantice complete. Pentru a înţelege finalul procesului Hawking, e nevoie de o teorie cuantică a gravitaţiei, spaţiului şi timpului, nu doar de una a materiei, ca în calculele lui Hawking.

Teoria corzilor se confruntă cu dificultăţi în tratarea regiunilor dense din jurul singularităţii, fiindcă nu dispune de o înţelegere detaliată a structurii spaţio-temporale, şi n-a oferit încă o imagine concretă a felului în care arată găurile negre în gravitaţia cuantică. Ea abordează asemenea probleme privind singularitatea de la

distanţă, practic de la distanţă infinită; oferă aşa-numita descriere holografică, în care tot ce se întâmplă undeva în spaţiu-timp e reprezentat prin structuri la marginea de la infinit a spaţiului-timp. (La fel cum o hologramă prezintă o scenă tridimensională pe un ecran bidimensional.) Matematic, procedeul e elegant, dar este indirect şi nu prea concret. Cu aceste construcţii, teoreticienii corzilor au tras în mod vag concluzia că nicio informaţie nu se pierde într-o gaură neagră, fiindcă ecranul infinit îndepărtat nu pierde informaţie. Rămâne însă întrebarea dacă descrierea prin intermediul ecranului e completă; dacă nu este, informaţia din starea completă ar putea fi pierdută.

Modelele din teoria corzilor au avut mai mult succes în descrierea orizontului decât în cea a singularităţii unei găuri negre. Deşi orizontul nu e o suprafaţă materială, ar trebui să aibă o structură microscopică datorită naturii spaţiului şi timpului. Putem încerca să numărăm cărămizile constitutive sau modurile posibile de a construi o gaură neagră de o anumită dimensiune. După cum au arătat Andrew Strominger şi Cumrun Vafa, în teoria corzilor putem număra toate stările posibile *entropia găurii negre).* Asemenea calcule sunt adesea considerate ca un prim test pe care orice teorie cuantică a gravitaţiei trebuie să-l treacă, iar ele au fost efectuate cu succes în teoria corzilor, cel puţin pentru anumite tipuri de găuri negre cu sarcină electrică mare. Aceste obiecte nu prea sunt realiste, fiindcă, atunci când colapsează o distribuţie de materie încărcată electric, sunt ejectate particule încărcate, iar gaura neagră care se formează e aproape neutră. Calculele din teoria corzilor reprezintă un indiciu important, dar nu sunt o dovadă că teoria e corectă, şi nici nu o privilegiază în raport cu altele. La scurt timp după teoria corzilor, şi gravitaţia cuantică cu bucle a reuşit să deducă şi să analizeze, pe cu totul altă

cale, entropia găurii negre – iar aceasta pentru o clasă de găuri negre neutre mult mai realiste.[73]

Mai interesant, dar şi mai complicat, decât numărul stărilor unei găuri negre de mărime dată este comportamentul ei atunci când schimbă energie cu mediul – fie absorbind în continuare materie, fie emiţând radiaţie Hawking. În reprezentarea discretă a gravitaţiei cuantice cu bucle, găurile negre sunt un sistem atomic constituit nu din blocuri de materie, ci din bucăţi de spaţiu-timp cuantificat. Când gaura neagră îşi modifică energia sau masa, e emis un foton Hawking. Radiaţia Hawking e descrisă de o teorie a undelor într-un spaţiu-timp dat, cam ca în formula radiaţiei într-o cutie neagră. Pentru a înţelege mai bine cum apare această radiaţie, trebuie să adăugăm o teorie a pereţilor cutiei şi a interacţiei lor cu radiaţia prin emisie sau absorbţie de fotoni. Găsind o explicaţie a formulei lui Planck, Einstein a reuşit să obţină o teorie a emisiei şi absorbţiei pentru cutia neagră.

Pentru o gaură neagră avem nevoie de o teorie cuantică a spaţiului-timp în apropierea orizontului, fiindcă acolo sunt generate particulele Hawking. O explicaţie finală trebuie să facă apel la gravitaţia cuantică. Odată obţinută explicaţia, am putea face spectroscopia găurilor negre la fel cum am făcut spectroscopia atomilor şi moleculelor, care a jucat un rol decisiv în elaborarea mecanicii cuantice. Mult timp de-acum încolo nu va fi însă cu putinţă compararea cu observaţiile, fiindcă ele ar trebui să măsoare nu doar radiaţia Hawking, dar şi detalii ale ei, cum e distribuţia intensităţii la diferite lungimi de undă. Pentru găurile negre astrofizice, universul nostru, în ciuda gradului de expansiune şi de diluare, e încă prea fierbinte, fondul cosmic de microunde copleşind radiaţia Hawking.

Totuşi, chiar şi spectroscopia teoretică ridică numeroase probleme interesante. Structura atomică a spaţiului şi timpului, aşa cum apare în

gravitaţia cuantică cu bucle, face ca aria suprafeţei şi masa găurii negre, legate între ele prin raza Schwarzschild, să poată lua doar valori discrete. Pe baza principiilor generale, acest lucru a fost postulat de Jacob Bekenstein cu puţin timp înaintea calculelor lui Hawking. Gravitaţia cuantică cu bucle face o propunere concretă pentru forma matematică a dimensiunilor discrete care se pot obţine prin aşezarea laolaltă a atomilor de spaţiu. Rămâne însă de văzut ce tranziţii au loc când apare radiaţia Hawking sau cum se transformă atomii de spaţiu în particule de radiaţie. De mare interes e întrebarea dacă gaura neagră are o stare fundamentală la fel ca cea a unui atom, şi ce spaţiu-timp ar reprezenta această stare. În analogia cu atomul, la capătul procesului Hawking ne-am aştepta ca gaura neagră să se afle în starea de energie minimă; forma ei ar trebui să ne spună dacă evaporarea Hawking distruge toată informaţia sau dacă există un miez compact în care aceasta e înmagazinată.

Apoi, analogia cu atomii ar putea duce la concluzii greşite, chiar dacă e valabilă în primele etape ale evaporării Hawking. Pe măsură ce gaura neagră scade, orizontul se apropie de singularitate, iar regiunea puternic curbată e încă şi mai aproape. Nimic comparabil nu se întâmplă în atomii de materie, la care energia scade pur şi simplu atunci când atomul se apropie de starea fundamentală. În starea fundamentală, proprietăţile teoriei cuantice sunt foarte importante, altminteri problema stabilităţii clasice n-ar fi rezolvată, însă nu apare niciun fenomen de înaltă densitate a energiei, ca în cazul singularităţii. Pentru a răspunde la întrebarea crucială privind găurile negre, trebuie să înţelegem singularitatea şi soarta ei în gravitaţia cuantică.

La fel ca în cosmologie, există două elemente ale gravitaţiei cuantice cu bucle care pot face ca singularitatea să dispară: forţele repulsive şi faptul că dispunem de mai mult timp prin discretizarea

timpului. În cazul găurilor negre nu ne putem baza pe situaţii simetrice ca în cosmologie, fiindcă omogenitatea ar fi prea mare: e nevoie de un punct central al simetriei la rotaţii, forţa gravitaţională variind cu distanţa până la acel punct. Calculele sunt mai complexe, iar posibilităţile oferite de gravitaţia cuantică n-au fost încă îndeajuns studiate. Dar şi aici apar indicii privind existenţa forţelor repulsive şi a timpului suplimentar, ba chiar există modele concrete fără singularităţi. Pentru Abhay Ashtekar şi pentru mine, în primii ani ai cosmologiei cuantice cu bucle aceasta a fost o şansă care ne-a permis să sondăm consecinţele teoriei într-un cadru mai general.[74] Deşi nu ştim cu certitudine dacă singularitatea e înlocuită de un univers-fiică sau dacă resturile găurii negre rămân în universul existent, se pot totuşi contura limpede procesele posibile.

Elementul fundamental este iarăşi caracterul discret al timpului. Nu toate punctele posibile ale timpului sunt accesibile, ci timpul „sare” în paşi fixaţi, precis controlaţi. Deşi dimensiunea pasului e foarte mică – nejucând aproape niciun rol în afara găurii negre, la orizont, ba chiar şi în interiorul găurilor negre mari –, el devine esenţial în apropierea singularităţii. Spre deosebire de timpul continuu al relativităţii generale, condamnat să se oprească după un interval finit şi să fie distrus odată cu teoria, timpul discret curge mai departe. Eliminarea unor puncte din timp la scară microscopică face cu putinţă apariţia unui nou cadru temporal mult mai mare, macroscopic, dincolo de singularitatea clasică a unei găuri negre. Într-o diagramă Penrose, acesta e reprezentat în stânga figurii 28. Pentru extinderea timpului este esenţial ca singularitatea dintr-o gaură neagră să fie un punct în timp, dar nu un punct în spaţiu, cum e centrul unei stele. Numai în felul acesta timpul discret poate sări peste singularitate şi deschide o lume nouă în viitor.

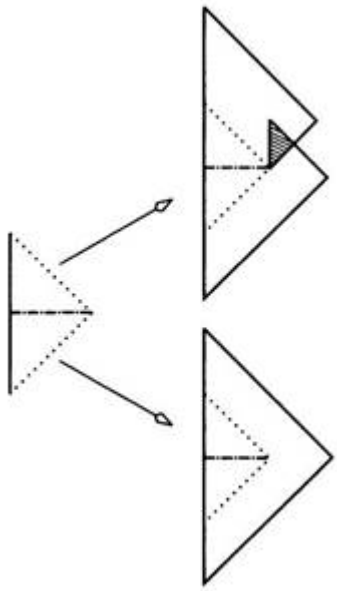


Figura 28. *Cele două posibilităţi de conectare cu exteriorul a interiorului unei găuri negre fără singularitate din gravitaţia cuantică. Fie există un punct de ramificare către un univers-fiică dincolo de singularitatea reprezentată haşurat, fie interiorul se află pur şi simplu într-un spaţiu-timp care îl înconjoară cu totul.*

În absenţa observaţiilor directe, nu ne putem lăsa călăuziţi decât de criteriul consistentei: detaliile precise ale teoriei clasice joacă un rol decisiv în determinarea mecanismului concret al teoriei cuantice, extinzând-o într-un mod care nu putea fi prevăzut la începuturile gravitaţiei cuantice. Găurile negre din relativitatea generală, aşa cum apar ele din colapsarea materiei, sunt caracterizate printr-o singularitate care e un punct-în-timp aflat în spatele orizontului, traversat de timpul discret, la fel ca singularitatea big bang din cosmologic. Dacă singularitatea găurii negre ar fi un punct în spaţiu precum centrul unei stele, timpul s-ar scurge paralel cu ea şi n-ar exista posibilitatea de străpungere a singularităţii şi de eliminare a ei. Singularităţile nude ar persista în gravitaţia cuantică – dacă nu cumva sunt deja interzise în relativitatea generală de cenzura cosmică.

Caracteristicile clasice şi cele cuantice ale teoriei joacă roluri importante, strâns împletite, ilustrând eleganţa şi coerenţa ideilor implicate. Gravitaţia cuantică e eficientă şi necruţătoare în eliminarea singularităţilor periculoase, dar şi economică atunci când e vorba de singularităţile deja dizolvate clasic. În ciuda incompletitudinii actuale a teoriei, soarta singularităţilor în gravitaţia cuantică oferă un test care trebuie luat în serios şi a fost trecut în forma deducţiilor matematice. Cu cât se acumulează testele trecute cu brio, cu atât sporeşte încrederea în teorie. Dacă ar pica la un test, prima soluţie ar fi îmbunătăţirea teoriei aşa încât să-l treacă, rezultatele precedentelor teste rămânând valabile. Dacă acest lucru n-ar fi cu putinţă sau dacă modificările ar face ca teoria să devină prea artificială, ar trebui până la urmă să renunţăm la ea. Chiar şi fără observaţii, speculaţiile teoretice exercită o puternică presiune selectivă.

Dacă singularitatea ca punct în timp e eliminată, există timp şi spaţiu în spatele singularităţii, sau, privind din exteriorul găurii negre, apare un univers după evaporarea Hawking a găurii negre. Întrebarea crucială este dacă noul spaţiu-timp din interior după singularitate este legat de spaţiul timp din exterior – sau, după cum am mai spus: se ramifică oare spaţiul-timp într-un univers-fiică în interiorul găurii negre, sau materia colapsată e aruncată înapoi în exterior? Întrebarea e importantă pentru descrierea fizică, dar şi pentru posibilităţile de observare din viitorul îndepărtat. Ea supune unui test întreaga noastră perspectivă asupra cosmosului şi fundamentele ei teoretice.

Spre deosebire de situaţia în care lumina traversează o regiune puternic curbată din jurul singularităţii clasice, e nevoie de o analiză precisă a modificărilor care au loc la nivelul constituenţilor elementari ai spaţiului-timp discret în punctul presupusei ramificări. În cursul

ramificării către un univers-fiică, spaţiul-timp ar trebui să se separe între doi atomi spaţiali învecinaţi, iniţial conectaţi, dar deconectaţi la următorul pas temporal – după singularitate. Teoria fiind deocamdată incompletă, nu se poate da un răspuns, dar avem indicii că nu are loc o ramificare către un univers-fiică, ci interiorul se uneşte cu exteriorul după ce orizontul se evaporă.

Materia colapsată va reapărea atunci pulverizată – poate într-o explozie vizibilă de la mare distanţă. Regiunea cu densitate şi curbură extrem de mari din jurul singularităţii clasice va deveni brusc accesibilă din exterior, ceea ce va reprezenta pesemne un eveniment cosmic violent. Nu apare acea pierdere de informaţii de care se temea Hawking, pentru că odată cu materia s-ar întoarce şi informaţia stocată. Ea ar putea fi deformată şi greu de descifrat, fiindcă va fi traversat regiunea internă puternic curbată, dar în principiu se află mai departe acolo, iar asta e de ajuns pentru consistenţa cadrului teoretic.

Demonstraţiile preliminare ale acestui comportament se bazează pe proprietăţile dinamice ale spaţiului-timp atomic, aşa cum apar ele în gravitaţia cuantică cu bucle. Ar putea exista într-adevăr o despicare a atomilor spaţiali învecinaţi acolo unde curbura e foarte mare şi domină aspectele cuantice. Spaţiul-timp anterior s-ar putea scinda în două regiuni separate. În funcţie de forma exactă a dinamicii, care n-a fost încă determinată, există două posibilităţi: fie părţile momentan separate se reconectează direct în următorul pas temporal discret, fie rămân separate pentru totdeauna.

Doar în al doilea caz poate apărea ramificarea într-un univers-fiică. Problema e însă că singularitatea punct-în-timp a găurii negre are extindere spaţială, pe când centrul unei stele obişnuite are extindere temporală, dar nu şi spaţială. Pentru scindarea interiorului unei găuri

negre într-un univers-fiică, ar trebui ca spaţiul-timp să se despice doar la unul din capetele singularităţii clasice – la una din laturile regiunii puternic curbate din relativitatea generală, punctul din extremitatea dreaptă în figurile noastre – şi în rest să rămână intact. Altminteri, interiorul s-ar diviza într-adevăr la orizont şi s-ar dezintegra imediat în numeroşi atomi de spaţiu-timp: un avort spontan cosmic care n-ar putea genera în niciun caz un univers-fiică.

Din moment ce regiunea puternic curbată e supusă legilor gravitaţiei cuantice nu doar la margini, ci pe toată întinderea ei, o despicare la margine e la fel de probabilă ca o ruptură oriunde în interior – nu există niciun motiv ca marginea să primească un tratament special. Acum teoria nu mai are de tranşat între ramificarea către un univers-fiică şi deschiderea găurii negre în spaţiul-timp iniţial, ci între a doua variantă şi dezintegrarea completă a interiorului.

Cum putem oare exclude varianta dezintegrării dezastruoase? Din fericire, e relativ simplu: interiorul unei găuri negre care nu se roteşte e supus aceloraşi legi care se întâlnesc în cosmologie, dacă presupunem perfecta omogenitate. Întregul spaţiu-timp al unei găuri negre, în special exteriorul lui, nu e omogen, fiindcă forţa gravitaţională variază cu distanţa până la singularitatea centrală; în interiorul orizontului însă, această dependenţă radială se transformă într-o dependenţă temporală. Şi în acest caz e esenţial faptul că singularitatea este un punct-în-timp: apropiindu-ne de orizont, scade raza (o coordonată spaţială), dar odată ce am trecut de orizont şi ne apropiem de singularitate, ne îndreptăm spre viitorul în care singularitatea se află, în timp, în faţa noastră. Prin urmare timpul, şi nu o coordonată spaţială, se modifică atunci când ne deplasăm spre curburi mai puternice. Din proprietăţile matematice ale soluţiei lui

Schwarzschild rezultă că interiorul poate fi considerat omogen, dar – la fel ca în cosmologie – dependent de timp.

Omogenitatea simplifică mult cercetările de dinamică, pentru că toate locurile din spaţiu pot fi considerate simultan. O singură ecuaţie, ca aceea de la pagina 139, trebuie rezolvată pentru tot interiorul, în locul a nenumărate ecuaţii pentru toţi atomii spaţiali. Cunoaştem deja rezultatul din cosmologia cuantică: singularitatea clasică e traversată fără ca spaţiul să se dezintegreze. Pentru o gaură neagră, asta înseamnă că interiorul ei trebuie să se deschidă spre exterior după ce orizontul se evaporă, devenind astfel vizibil unui observator.

În ciuda cunoaşterii incomplete a gravitaţiei cuantice, avem de-a face cu o predicţie univocă. Să nu uităm totuşi că în acest lanţ de raţionamente am apelat la diferite presupuneri care trebuie confirmate prin calcule detaliate sau ţin chiar de clementele teoretice care ne lipsesc. Pasul cel mai important va fi îmbinarea dinamicii interioare, pentru care am folosit rezultate din cosmologie, cu dinamica externă, deocamdată puţin înţeleasă. Am început argumentaţia punând condiţia de completitudine a unei teorii care să combine coerent dinamica interiorului omogen cu dinamica exteriorului, prin care e descrisă evaporarea orizontului. Descrierea dată aici ar putea fi considerată o predicţie pe baza ingredientelor actuale ale teoriei, a cărei consistenţă rămâne să fie confirmată prin calcule ulterioare. Dacă procedeul funcţionează, rezultatul ar putea fi generalizat la găurile negre în rotaţie, pentru care argumentele de acum îşi pierd valabilitatea din cauza interiorului neomogen.

Relaţia dintre interiorul găurilor negre nerotaţionale şi ecuaţiile cosmologice ne oferă o imagine preliminară, dar concretă, privind soarta găurii negre după evaporare. Din nou este decisivă

existenţa unei forţe repulsive, care apare la comprimări puternice ale materiei colapsate atunci când luăm în considerare gravitaţia cuantică. Materia nu poate colapsa complet în punctul în timp al singularităţii clasice, ci se împrăştie în exterior după o comprimare suficient de puternică. La fel ca în cosmologie, capacitatea limitată de stocare a timpului discret e răspunzătoare pentru apariţia acestei forţe de sens contrar. Compresia maximă e obţinută în centrul găurii negre, permiţând existenţa singularităţii în relativitatea generală, dar nu şi în gravitaţia cuantică. Privit din exterior, acest punct e marcat de dispariţia orizontului prin evaporare. După cum se vede în figura 29, spre deosebire de scenariul clasic, interiorul devine din nou vizibil din exterior sub forma materiei fierbinţi şi extrem de dense dispersate de forţele repulsive ale gravitaţiei cuantice ca o miniexplozie. Din exterior, am observa întâi restul radiaţiei Hawking, iar apoi strălucirea mult mai intensă a exploziei interiorului.

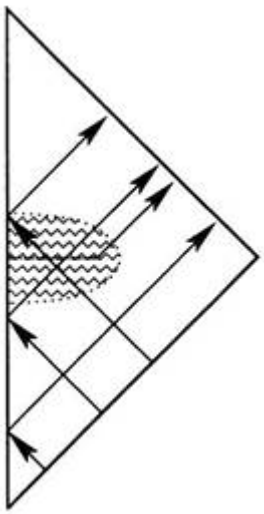


Figura 29. *Reprezentare a observaţiilor astronomice pentru o gaură neagră nesingulară. Deplasându-ne în timp de-a lungul laturii din dreapta sus, captăm întâi radiaţia care trecuse prin gaura neagră înainte ca aceasta să se formeze (săgeata de jos). Ca prim semnal venit de la gaura neagră, vedem radiaţia Hawking*

care evadează de la marginea singularităţii clasice. Apoi, toată radiaţia provenind din regiunea găurii negre a trecut prin etapa de curbură puternică. Această radiaţie duce cu sine rămăşiţele materiei care a căzut în gaura neagră şi poate conţine cantităţi uriaşe de energie. Scenariul acesta a fost obţinut în gravitaţia cuantică cu bucle, dar recent şi în teoria corzilor, pornind de la premise diferite, de către Gary Horowitz. Peter Bergmann, Tom Roman şi Sean Hayward anticipaseră acest comportament pe o cale independentă de gravitaţia cuantică.

După cum am spus, această imagine rămâne să fie confirmată de calcule ulterioare – necesare, de pildă, pentru estimarea cantitativă a energiilor implicate. Deşi e aproape sigur că energia radiată la dezvăluirea interiorului e mult mai mare decât cea a radiaţiei Hawking din stadiul final, ea ar putea reprezenta doar o parte din cea a întregii materii colapsate. La urma urmei, durează mult până când se evaporă o gaură, iar în acest timp o mare parte din energia totală poate fi deja emisă prin procesul Hawking. Până când aceste lucruri nu sunt lămurite, nu vom avea o estimare corectă a intensităţii şi strălucirii posibilei explozii a găurii negre. Ţinând însă cont de curburile extrem de puternice din interior, comparabile doar cu cele de la big bang, trebuie să ne aşteptăm la un eveniment spectaculos. Din nefericire (sau poate din fericire) avem mult de aşteptat până să se întâmple aşa ceva în universul nostru. Deşi slabă, radiaţia cosmică de fond împiedică deocamdată găurile negre să se evapore.

> *La început, gravonomului de serviciu nu i se păru ieşită din comun pata aceea de lumină pe cerul nopţii, dar ea rupea totuşi monotonia muncii sale de rutină. Asemenea erupţii nu mai erau spectaculoase, deşi reprezentau singurele evenimente cosmice vizibile cu ochiul liber. Tot restul era de mult stins, odată ce expansiunea universului*

dusese celelalte galaxii, iar apoi şi stelele învecinate, la distanţe colosale. Dar neobosita expansiune făcuse şi ca radiaţia fondului cosmic să se răcească şi mai mult, permiţând până şi evaporarea găurilor negre masive. La mult timp după colaps şi compresie, materia lor reapărea în explozii uriaşe. Acestea erau principalele surse de unde gravitaţionale, a căror detecţie prin gravonomie înlocuise tradiţionala scrutare a cerului prin astronomie.

Cercetarea ştiinţifică a universului a cunoscut un declin, gravonomia trecând sub controlul armatei. Cum universul devenea tot mai vast şi mai rarefiat, soarta lui părea limpede, aşa încât interesul ştiinţific pentru undele gravitaţionale şi alte mesaje cosmice slabe a scăzut. Vechile observatoare erau în schimb folosite pentru supraveghere militară. După epuizarea surselor tradiţionale de energie, extragerea energiei din găurile negre prin proces Penrose a devenit ultima şansă a vieţii. În acest scop, găurile negre naturale fuseseră mărite artificial printr-un proces numit „lărgirea orizontului La început, omenirea se folosise de prilej pentru a elimina civilizaţiile antipatice care aveau ghinionul de a se afla în apropierea unei găuri negre, dar această practică a fost curând interzisă. Dintre toate civilizaţiile universului, omenirea se distinsese, ca de obicei, prin puterea sa distructivă. În plus, avusese şansa să fi ajuns încă dintr-o fază timpurie a istoriei sale la o bună descriere teoretică a spaţiului-timp prin relativitatea generală. (Condiţiile politice împiedicaseră decenii de-a rândul cercetările gravitaţionale, dar ele n-au mai jucat niciun rol în secolele următoare.) Aceste cunoştinţe şi aplicarea lor au fost folosite de omenire

pentru a-şi consolida dominaţia, după care lărgirea orizontului a fost oficial interzisă. Doar câteva galaxii dubioase erau bănuite de folosirea lărgirii orizontului, şi erau supravegheate pentru a se detecta undele gravitaţionale emise în cursul lărgirii.

Şi companiile energetice sprijiniseră la început lărgirea orizontului, dar pentru un alt motiv: ele înţeleseseră pericolul expansiunii continue a universului. Încet, dar inevitabil, diluarea materiei urma să condamne la dispariţie până şi găurile negre masive, ultimele resurse de energie. Ele susţineau deceleratorul Buchert: de multă vreme fusese stabilit că energia întunecată, sursa expansiunii accelerate, era rezultatul neomogenităţii în universul care devenise tot mai structurat după big bang. În speranţa că neomogenitatea va scădea odată cu dispariţia a numeroase galaxii în găuri negre, s-a apelat iniţial fără restricţii la lărgiri ale orizontului.

Acestea s-au dovedit a fi un imens eşec, fiindcă materia căzută în găurile negre contribuie la masa lor şi nu slăbeşte suficient forţa gravitaţională şi distribuţia ei neomogenă. Cu excepţia eliminării galaxiilor, excesivele lărgiri ale orizontului avuseseră puţine consecinţe. Ele au diminuat totuşi întru câtva acceleraţia, ca rezultat al diluării neomogenităţii într-un univers în expansiune. Evident, guvernul intergalactic a văzut în asta un succes al politicii militare şi energetice.

Aducându-şi aminte de toate aceste lucruri citite în cărţile de istorie, gravonomul trase pentru moment concluzia că această din urmă observaţie era o explozie naturală după evaporarea unei găuri negre, dar semnalul era uşor diferit. Când mai privi o dată ecranul, care înfăţişă spectrul undei

gravitaţionale în toate detaliile ei, observă ceva remarcabil.

Evaporarea şi explozia găurilor negre fuseseră descrise de teoria încovoierii, cea care, după eforturi de milenii, devenise teoria cuantică a gravitaţiei, combinând avantajele tuturor teoriilor precedente. Ea fusese testată cu succes în cazul radiaţiei cosmice de fond, care pălise mult şi îşi dădea ultima suflare. Apoi, când primele găuri negre explodaseră, teoria încovoierii fusese iarăşi confirmată, iar de atunci era considerată teoria finală şi fundamentală a universului. În acest ultim eveniment, gravonomul a recunoscut imediat caracteristicile spectrului undelor gravitaţionale emise de o gaură neagră care explodează. La frecvenţe înalte apăreau totuşi valori dincolo de marja de eroare. Şi dacă teoria încovoierii nu era de fapt ultimul cuvânt al fizicii teoretice?

Vestea unei posibile abateri ale observaţiilor de la teorie – prima după multe secole – se răspândi cu repeziciune. Se efectuară noi calcule, se încercară modificări ale teoriei încovoierii – toate în zadar. Până la urmă, explicaţia se dovedi a fi mult mai simplă. Scotocind prin arhive, un istoric găsi date despre vechea misiune a capsulei Kruskal, înghiţită de o gaură neagră din centrul unei galaxii medii. Oamenii de ştiinţă au înţeles atunci că partea de frecvenţă înaltă a undei gravitaţionale era semnalul transmis de capsulă în timp ce se îndrepta spre pieire. Aşa că noua observaţie contribui în cele din urmă la triumful teoriei, căci fusese găsit primul semnal care, spre deosebire de lumină, străbătuse regiunea centrală extrem de fierbinte şi densă a unei găuri negre. Odată cunoscută originea semnalului, observaţia putea fi pusă în acord cu teoria…

CAPITOLUL 7.
Săgeata timpului.
O lume care îmbătrâneşte

Ne-am luptat cu Megadele, care se nasc bătrâne,
întineresc cu fiecare an, iar când mor sunt prunci…

Oscar Wilde, *Pescarul şi sufletul său*

Deseori timpul ne creează dificultăţi. Totul ar fi mult mai uşor dacă timpul s-ar comporta la fel ca spaţiul. Am putea face atunci un pas înapoi în timp pentru a ne îndrepta greşelile din trecut sau a ne întoarce la o ocazie ratată. Sau am putea cumpăra timp suplimentar atunci când intrăm în criză de timp. Viaţa e ţinută strâns în chingile timpului: la început totul se întâmplă atât de repede, încât nici nu observăm cum ni se scurge viitorul, pentru ca, în cele din urmă, acel lucru care ne împinge mereu de la spate ne lasă în urmă pentru totdeauna şi merge mai departe cu cei care rămân.

De ce se deosebeşte timpul atât de mult de spaţiu, când, conform relativităţii generale, cele două alcătuiesc spaţiul-timp, ba chiar se pot transforma parţial una într-alta?

Conceptul de timp:
Raportarea la mişcare

Oare timpul n-are timp?
Friedrich Nietzsche, *Ştiinţa voioasă*

În viaţa de zi cu zi timpul poartă amprenta înaintării sale de neoprit, deosebind net trecutul de viitor. Esenţială aici e memoria, care ne readuce în minte (şi adesea uită) trecutul, dezvăluindu-ne astfel existenţa viitorului. Trecutul recent e reconstruit ca viitor parţial al unui trecut mai îndepărtat. Unele evenimente, chiar şi cele neimportante, au consecinţe directe; în reconstrucţia din memorie ele sunt prinse în relaţii cauzale. Ne aşteptăm deci ca în viitor să apară consecinţe asemănătoare ale evenimentelor din prezent.

Deşi comun, acest concept de timp e extrem de complex şi trebuie deosebit de timpul matematic, care se presupune a descrie natura independent de memorie – ca numerotarea cadrelor unui film, repere pentru organizarea evenimentelor în ordinea lor cauzală, iar nu ca un actor participând la acţiune. Sunt prezentate fie poziţiile corpurilor (în fizica clasică), fie forma funcţiei de undă (în fizica cuantică). Chiar şi în relativitatea generală lucrurile stau la fel, deşi timpul joacă un rol mai activ, putând, de pildă, ajunge la capăt. Odată ce se poate transforma în spaţiu, timpul nu mai oferă repere absolute, ci repere depinzând de observator; el determină totuşi ce evenimente pot provoca alte evenimente şi ce evenimente nu pot fi legate cauzal.

Imaginea matematică a timpului e utilă în cercetări concrete, dar e idealizată. Acest timp nu e

observat ca atare, ceea ce vedem sunt modificări în configuraţiile materiei, cum ar fi poziţia Soarelui în raport cu Pământul sau a limbilor ceasului în raport cu cadranul. Ceasornicele de orice tip sunt alcătuite din materie, sunt supuse legilor naturii şi influenţei unor alte materii. Spunem că un ceasornic e exact dacă influenţa altor obiecte e mică, dar întotdeauna există o influenţă cât de slabă; acesta e motivul pentru care imaginea unui timp complet independent de materie este o idealizare. Mişcarea fizică reală se raportează mereu la ceva, la fel cum oscilaţia unui pendul e măsurată în raport cu acele ceasornicului. Ceea ce observăm e doar materia, niciodată timpul însuşi.[75] Lucrul acesta e important cu precădere în cosmologie şi în versiunea ei cuantică, după cum vom vedea în curând. Deşi condiţiile actuale de pe Pământ permit construirea unor ceasornice utile, ar putea exista regiuni, mai ales în fazele timpurii ale universului, în care interacţiunile puternice dintre componentele materiei nu pot fi evitate, de pildă din cauza densităţilor înalte. În asemenea cazuri, ca măsură a timpului am putea folosi mărimi cosmologice, cum ar fi modificarea volumului universului sau a densităţii lui.

În raport atât cu timpul matematic, cât şi cu cel fizic, legile naturii determină comportamentul general, iar valorile iniţiale determină situaţii particulare. Această dualitate îşi pune amprenta asupra descrierii matematice prin ecuaţii diferenţiale. Dacă ni se dau, de pildă, poziţiile şi vitezele planetelor la un moment dat, legile relativităţii generale determină evoluţia lor în timp. Nu există aici nicio diferenţă între trecut şi viitor: dacă la un moment ulterior oprim mişcarea şi inversăm sensul vitezelor planetelor, obţinem exact aceleaşi traiectorii, doar timpul având direcţie opusă. Cum poate apărea într-o asemenea lume memoria care face totuşi deosebirea între trecut şi viitor?

Entropia:
Comportament dezordonat

> Nu poţi să mai întorci anii îndărăt. Ca şi cum ai vrea să ţii apa în palme. Ai vrea să te mai întorci la vremea de atunci? Atunci începea tocmai. Ai vrea?
>
> James Joyce, *Ulise*[76]

Majoritatea proceselor biologice nu implică doar câteva corpuri bine delimitate, cum sunt planetele, ci se bazează pe mişcarea a nenumăraţi atomi imposibil de urmărit individual.

Pentru a organiza o asemenea harababură, măsurătorile şi descrierile teoretice se concentrează asupra mărimilor colective ale tuturor constituenţilor microscopici, cum sunt volumul pe care îl ocupă împreună, presiunea (măsura forţei totale acţionând prin impact atomic asupra pereţilor incintei) sau temperatura (măsura vitezei medii a particulelor).

Spre deosebire de numărul enorm al poziţiilor particulelor, multe dintre aceste mărimi colective se modifică într-un mod ireversibil în timp. Lucrul e cunoscut din viaţa de zi cu zi: forma unui vas ca o măsură colectivă a tuturor constituenţilor lui, se modifică radical atunci când vasul se sparge, fără să se poată reveni cu uşurinţă la forma iniţială. Procesul în care un vas se sparge e net diferit de cel în care fragmentele zboară în chip miraculos, contopindu-se într-un vas intact. Putem lesne deosebi un film în care vasul se sparge de cel în care procesul e inversat temporal, ceva de neconceput pentru mişcarea moleculară.

Contradicţia dintre reversibilitatea mişcării constituenţilor microscopici ai unui vas, pe de o

parte, şi ireversibilitatea macroscopică a mişcării întregului vas, pe de altă parte, îşi găseşte explicaţia în forma specială a condiţiilor iniţiale necesare pentru o mărime colectivă cum e forma. Când cade spre podea, unde se va sparge, constituenţii vasului au poziţii şi viteze iniţiale puternic coordonate. Dimpotrivă, vasul spart e împrăştiat în numeroase fragmente ale căror poziţii, orientări şi viteze diferă mult între ele. E aproape de neimaginat să le putem pune în mişcare aşa încât să se recombine într-un vas întreg, printr-o inversie temporală a spargerii.

Diferenţa esenţială dintre un vas intact şi unul spart ţine de starea de ordine. Într-un vas nespart, toţi constituenţii şi vitezele lor se supun, prin construcţie, unui aranjament precis şi unor relaţii reciproc. Într-un vas spart, ordinea şi coeziunea sunt parţial eliminate; cioburile zac la întâmplare în spaţiu. Starea unui vas intact e cu totul deosebită faţă de cea a unuia spart, fiindcă există mult mai multe configuraţii pentru un vas spart decât pentru unul intact. Măsura fizică a acestui tip de dezordine se numeşte *entropie* şi e dată de numărul stărilor microscopice corespunzând poziţiilor atomice într-o stare macroscopică specificată de câteva mărimi colective. Pentru un vas intact entropia e scăzută, dar pentru unul spart e ridicată; în mod normal, e mult mai uşor ca ea să crească decât să scadă. Vasul a fost creat într-o stare de entropie scăzută, pentru ca apoi să se spargă sau măcar să se uzeze, şi să ajungă inevitabil într-o stare de entropie mai ridicată.

Dar cum reuşim să avem de la început un vas de entropie scăzută? Materialul trebuie cumva modelat şi stabilizat, într-un proces care scade entropia. Acest lucru e posibil doar folosind energie obţinută, de pildă, prin arderea unui combustibil cum sunt cărbunele sau petrolul. Arderea în sine e un proces în care entropia creşte, căci o substanţă ordonată (solidă sau lichidă), ai

cărei constituenţi trebuie într-o oarecare măsură să se mişte coordonat, e transformată într-un gaz dezordonat de entropie mai mare. Entropia combustibilului trebuie să crească pentru ca noi să putem fabrica un vas de entropie scăzută. După cum se poate demonstra într-un cadru mai general, creşterea entropiei prin ardere depăşeşte scăderea entropiei prin producerea unui obiect ordonat. Ţinând cont de toate elementele care intră în joc, entropia nu poate să scadă.

Astfel apare disparitatea dintre trecut şi viitor în percepţia noastră care ignoră detaliile microscopice. Memoria noastră se bazează pe ceea ce percepem şi ne înfăţişează deci o lume care deosebeşte trecutul de viitor. Dar, chiar şi dacă am putea observa direct mişcarea atomilor, ar trebui să înregistrăm o cantitate prea mare de informaţie, aşa încât am fi obligaţi s-o reducem la câteva mărimi colective în memoria noastră. În felul acesta poate fi explicat contrastul dintre reversibilitatea microscopică şi ireversibilitatea colectivă.

Din perspectivă cosmologică, aceasta conduce la o problemă deseori adusă în discuţie: dacă entropia creşte continuu, atunci cu mult timp în urmă ea trebuie să fi fost mult mai mică decât e acum. La un moment dat trebuie să fi avut valoarea minimă posibilă, într-o stare de ordine perfectă. Cum a putut apărea o asemenea stare – una din care s-a născut lumea, condamnând-o însă să nu mai fie niciodată perfectă?

Am formulat această problemă aplicând experienţa noastră terestră întregului univers, dar am ignorat gravitaţia, care poate spori ordinea în virtutea naturii sale atractive. Un gaz uniform distribuit, aşa cum era materia la scurt timp după big bang, avea o ordine scăzută, deci o entropie relativ mare. Fără gravitaţie, această distribuţie n-are cum să se schimbe prea mult.

Gravitaţia acţionează însă inexorabil şi conduce la o concentrare a regiunilor unde de! a bun început hazardul (prin fluctuaţiile cuantice) a făcut ca densitatea gazului să fie mai mare. În timp, în univers apar structurile ordonate, culminând cu formarea stelelor şi galaxiilor. Ansamblul acestor structuri e mult mai ordonat decât starea iniţială; prin acţiunea gravitaţiei, entropia a scăzut. Din când în când se formează stele care îşi revarsă lumina asupra vreunei planete, oferindu-i astfel energie din fuziunea nucleară care are loc în interiorul lor fierbinte, supus comprimării gravitaţionale. În condiţii propice, cum sunt cele de pe Pământ, pot apărea structuri mult mai ordonate, perpetuându-se ca forme de viaţă prin consumarea energiei primite.

În locul unei entropii care creşte mereu, ar trebui deci să ne închipuim mai curând, aşa cum a făcut-o Luwdig Boltzmann, o entropie aproape constantă, care scade local prin anumite procese fizice sau din pură întâmplare. În aceste oaze de ordine, au loc procese ulterioare care cresc entropia, aducând-o la nivelul iniţial. Din perspectiva unui observator extern, metafizic, aflat în afara universului şi văzând totul, în întreaga extindere temporală, starea actuală a parametrilor cosmologici pare să fie una de entropie extrem de ridicată. Există în fond foarte multe posibilităţi pentru felul în care poate arăta un univers cu anumite dimensiuni, rată şi acceleraţie de expansiune. Toate detaliile distribuţiei exacte a galaxiilor, stelelor şi planetelor, ba chiar şi a atomilor din ele, sunt irelevante în acest context, astfel încât universul actual seamănă mai curând cu un vas făcut ţăndări decât cu unul intact. Universul, aşa cum îl vedem, nu e decât una dintre numeroasele posibilităţi, care, toate, ar avea aceeaşi formă a mărimilor cosmologice colective, cum sunt radiaţia cosmică de fond sau distribuţia galaxiilor la scară mare. Privit în ansamblul lui,

universul pare să fie în acord cu sistemele cunoscute din experienţa cotidiană, care ne-au obişnuit cu o continuă creştere a entropiei.

Cosmologii se confruntă aici cu o problemă, fiindcă presupunem că entropia e tot mai mică pe măsură ce ne întoarcem în timp. Lucrurile devin şi mai grave dacă universul n-a apărut cu un timp finit în urmă, ci există dintotdeauna – poate într-o nesfârşită succesiune de cicluri, uneori dilatându-se, alteori colapsând, după cum pare să se întâmple dacă gravitaţia cuantică elimină singularitatea big bang. Cu cât plasăm mai departe înapoi în timp punctul iniţial al universului, cu atât entropia trebuie să fi fost mai mică, pentru a creşte continuu până la valoarea ei actuală. Ar trebui să postulăm o stare iniţială particulară extrem de ordonată, care să conducă determinist exact la starea universului din prezent (proces numit *reglare fină,* în limbajul cosmologilor). Un asemenea postulat ar putea fi acceptat, dar, dacă introducem o stare iniţială aparte, teoria ar trebui să dea şi o explicaţie convingătoare pentru originea ei. Problema apare deci oarecum modificată: cum să explicăm starea actuală, aparent atât de deosebită, fără să presupunem o stare iniţială cu totul deosebită?

Această perspectivă, larg răspândită, e deseori rezultatul unor false analogii. Ceea ce vrem să explicăm în cosmologic este în primul rând imaginea universului la scară mare şi posibilitatea ca vecinătatea sistemului solar să permită existenţa noastră ca forme de viaţă. Pentru asta dispunem de observaţiile din prezent şi vom dispune de cele din viitorul previzibil. Din perspectivă cosmologică, universul actual este de interes doar ca o stare macroscopică în care sunt ignorate detaliile, a cărei formă decurge din teoriile cosmologice în vigoare.

Observaţiile cosmologice, cum sunt distribuţia radiaţiei de fond şi cea a galaxiilor, determină câteva mărimi colective care nu sunt influenţate de poziţia exactă a stelelor individuale. Pentru

existenţa noastră sunt extrem de importante proprietăţile sistemului solar, de pildă distanţa de la Pământ la Soare, fiindcă alte valori ar face ca Pământul să fie prea rece sau prea cald pentru viaţă, aşa cum o cunoaştem. Dar există doar un număr limitat de parametri, toţi jucând rolul de mărimi colective. Cu această stare macroscopică sunt compatibile o mulţime de stări microscopice – stări care se deosebesc de cele macroscopice observate în univers prin detalii care, deşi esenţiale pentru existenţa noastră, nu sunt relevante cosmologic.

Pentru un supraobservator din afara universului, configuraţia actuală a galaxiilor şi stelelor, ajungând până la sistemul nostru solar, ar părea una cu totul specială. El ar conchide că aceasta ar putea proveni doar dintr-o stare iniţială foarte fin reglată. Dar noi nu suntem un asemenea observator, care nici măcar nu poate exista în lumea fizică, ci trebuie să tragem concluzii, fie ele cât de îndrăzneţe, dinăuntrul universului. Vedem nu numai starea macroscopică a universului, ci şi o parte din starea lui microscopică, prin însăşi experienţa vieţii noastre pe Pământ, iar astfel, chiar dacă se referă la mărimi colective, datele noastre de observaţie caracterizează în bună măsură această stare microscopică.

Prin urmare, nu ne interesează doar cantităţile macroscopice, pentru care entropia este parametrul important. Am putea spune că trăim pe ciobul unui vas spart, iar pentru noi ciobul e cel puţin la fel de important ca întregul vas. Există nenumărate configuraţii ale cioburilor, dar probabilitatea ca una dintre ele să ia forma particulară a celui pe care se întâmplă să ne aflăm e foarte mică. Ca observatori din interiorul sistemului reprezentat de întregul univers, urmărim anumite detalii microscopice şi lăsăm în suspensie problemele care ar apărea din creşterea entropiei. Vedem cu mare precizie vecinătatea noastră, dar, din

perspectivă cosmologică, aceasta nu e decât o stare microscopică aleatoare. Ciobul pe care trăim se întâmplă pur şi simplu să fie aşa cum îl vedem noi. Nimic mai mult nu poate fi explicat.

Săgeata timpului: O lume în haos

Fiecare clipă nu face decât s-o aducă după sine pe următoarea.

Jean-Paul Sattre, *Greaţa*

Existenţa unei săgeţi a timpului e considerată adesea unul dintre marile mistere ale fizicii, mai ales ale cosmologiei. Uneori această orientare a timpului se pune pe seama entropiei, care face să crească dezordinea totală în univers, deosebind astfel trecutul de viitor. Când avem însă în vedere caracterul parţial microscopic al observaţiilor noastre, entropia încetează să mai fie un candidat pentru explicarea săgeţii timpului. Entropia depinde mereu de gradul de precizie al observaţiilor, iar apoi al descrierii teoretice. Aceasta nu poate explica fenomenul resimţit zi de zi prin care suntem continuu împinşi înainte în timp, fără să putem face un pas înapoi sau măcar să avem puţin răgaz. Altminteri, precizia atomică a observaţiilor, combinată cu o memorie fotografică, prin care avem acces la fizica microscopică reversibilă temporal, ne-ar permite să ne întoarcem în timp ceea ce nu-i de închipuit.

Înainte să intrăm în detalii trebuie să lămurim ce este, şi mai ales ce nu este, săgeata timpului, în particular, întrebarea de ce nu putem pur şi simplu inversa săgeata timpului e independentă de fantezia ispititoare a călătoriei în timp. În cursul călătoriei în timp, în sens uzual, de a cărei (im)posibilitate nu ne ocupăm aici, timpul nu curge invers, ci doar înaintează diferit pentru unii oameni. Ei se află într-o regiune mărginită, care, după un proces neprecizat, ajunge în trecutul vecinătăţii sale. Nu are loc vreun pas înapoi în

timp nici pentru martorii externi, nici pentru călătorii în timp, ci o regiune a spaţiului e separată de lumea exterioară şi supusă unui proces temporal modificat. Când călătorii în timp se aventurează în trecutul vecinătăţii lor, propriul lor timp continuă să curgă înainte. La urma urmei, ei îşi păstrează amintirile din tot trecutul lor, din care o parte se află acum în viitorul vecinătăţii lor, şi nu întineresc, nici nu mor atunci când ajung în timp înainte de naşterea lor. Întrebarea de ce, spre deosebire de spaţiu, timpul e un drum cu sens unic e independentă de întrebarea privind posibilitatea călătoriei în timp.

De ce nu se poate face cale întoarsă în timp? întrebarea aceasta porneşte de la o neînţelegere. Experienţa noastră primordială e mişcarea, iar noi nu ne mişcăm nici în spaţiu, nici în timp, ci în spaţiu-timp. N-are sens să vorbim despre mişcare în spaţiu independent de timp, sau de mişcare în timp independent de spaţiu. Mişcarea este o modificare a poziţiei în spaţiu în cursul unui anumit interval de timp. Chiar şi înainte de a studia relativitatea, putem spune că între spaţiu şi timp există o legătură indisolubilă. Mişcarea însăşi ar fi imposibilă dacă am avea de ales direcţia în timp, la fel ca în spaţiu. Timpul elementar rezultat din experienţa mişcării – independent de faptul că viaţa a condus la ceva atât de rafinat cum e memoria – nu e un parametru rigid, ci doar un mijloc de a defini transformarea şi mişcarea.

După cum am arătat la începutul capitolului, în fizică ne folosim de o reprezentare a proceselor care au loc în timpul matematic – în felul acesta sunt organizate de regulă calculele în fizica teoretică. Ceea ce măsurăm de fapt sunt însă relaţiile dintre observabile. Timpul însuşi e măsurat de dispozitive precum ceasornicele; procesul de măsurare ne dă deci relaţia între, să zicem, poziţia unui obiect şi limba ceasornicului. Introducerea timpului e un pas suplimentar, definit

prin convenţie. Nici în cosmologic nu măsurăm expansiunea universului în funcţie de timp, deşi aceasta e forma pe care o iau iniţial soluţiile din relativitatea generală. Ceea ce măsurăm e viteza cu care se îndepărtează o stea, prin deplasarea spre roşu a spectrului ei de emisie, precum şi distanţa până la ea, prin comparaţie cu etaloanele de luminozitate. Folosind relativitatea generală, această relaţie poate fi tradusă într-o expansiune a universului în funcţie de timp, pentru a fi apoi comparată cu soluţiile matematice. Această comparaţie e cea care ne-a oferit indicii privind energia întunecată, prin observarea mai multor supernove. Prin urmare, descrierea mişcării pe baza unor relaţii – în care se obţine raportul dintre anumite cantităţi, raport comparat apoi direct cu observaţiile – reflectă mai realist ceea ce măsurăm de fapt. Ideea aceasta joacă un rol important mai ales în gravitaţia cuantică, dar nu oferă o soluţie pentru direcţia timpului, fiindcă în relaţie intră şi spaţiul, la care avem acces doar prin măsurători de distanţă între diferitele obiecte materiale. Relaţia dintre spaţiu şi timp nu poate explica diferenţa dintre cele două în privinţa caracterului orientat.

Poate părea surprinzător, dar singura alternativă la caracterul direcţional al timpului, care ar face ca spaţiul şi timpul să nu joace roluri diferite, este imposibilitatea oricărui fel de mişcare. Să poţi hotărî în mod arbitrar între a te deplasa spre viitor sau spre trecut e o imposibilitate; ai rămâne paralizat, incapabil să alegi, fiindcă n-ar exista niciun reper pentru a face un pas înapoi în timp. Ce s-a întâmplat cu mine în urmă cu cinci minute este influenţa lumii (inclusiv a propriului meu corp) asupra mea, pe când mă aflam într-o anumită stare caracterizând vârsta mea de acum cinci minute. În stări diferite au loc alte acţiuni, şi sunt percepute de noi drept curgerea timpului, din moment ce mintea e influenţată de propriul ei corp pentru a memora parţial stările trecute. Timpul în

sine e o mărime abstrasă: e un parametru a cărui formă particulară e aleasă în mod convenţional şi e folosită pentru a determina mişcarea; mişcarea e în mod fundamental relaţională şi descrie interacţiunea complicată între diferite lucruri, nu între un lucru şi timp. În acelaşi fel. percepţia psihologică a timpului ca principiu organizator al conţinuturilor memoriei se bazează în ultimă instanţă pe o convenţie rezultând din evoluţie, a cărei distrugere ar face imposibilă orice recunoaştere a mişcării. Dacă ar fi permisă modificarea direcţiei timpului, această convenţie ar fi răsturnată. Niciuna dintre aceste stări relaţionale nu poate fi schimbată prin alegere conştientă – lucru de care ar fi nevoie pentru inversarea timpului după bunul-plac, ceea ce ar însemna într-adevăr o întoarcere către stările trecute şi, poate, memorate.

În încercarea de a lămuri caracterul direcţional al timpului ajungi în cele din urmă la o problemă mult mai veche decât teoria relativităţii: problema existenţei mişcării şi a schimbării care i-a tulburat pe filosofi începând cu Parmenide. El a ajuns să nege radical mişcarea, considerând-o pură iluzie. În ciuda dificultăţii evidente de a reconcilia o asemenea perspectivă cu cele mai elementare observaţii, această ipoteză şi-a păstrat influenţa de-a lungul secolelor – începând cu Zenon, discipolul lui Parmenide, şi cu filosofii atomişti Leucip şi Democrit, iar apoi, prin filosofi precum Schopenhauer, ajungând până la fizicieni precum Schrödinger. Problema rămâne deschisă din perspectivă filosofică, dar în felul acesta am păşit în afara fizicii, a cărei sarcină e să descrie schimbarea şi mişcarea, acceptând astfel că ele sunt deja date.

În fine, putem face speculaţii despre inversarea săgeţii timpului în cadrul cosmologiei cuantice. Din raţiuni matematice, este deseori util să considerăm volumul universului ca un parametru

pentru a descrie relaţional modificarea temporală. Acest timp avansează într-un univers în expansiune, dar ce se întâmplă dacă într-o bună zi universul îşi opreşte expansiunea şi colapsează? Volumul lui ar începe să scadă – şi poate că timpul ar regresa. Ipoteza aceasta a fost formulată încă înainte de apariţia cosmologiei cuantice, în 1958, de Thomas Gold.

Un asemenea comportament al volumul universului e posibil în relativitatea generală, deşi estimările actuale ale parametrilor cosmologici îl fac puţin probabil. Îşi schimbă oare timpul direcţia în acest punct de inversie, nu prin decizia observatorilor din univers, ci prin evoluţia universului însuşi? Câtă vreme natura timpului în gravitaţia cuantică nu e deplin lămurită, nu putem şti.

E totuşi mult mai probabil ca o asemenea inversare a săgeţii timpului să fie doar o iluzie generată de descrierea matematică aleasă. Dacă mergem pe Pământ pe un drum care trece prin Polul Nord, la început latitudinea creşte, dar, odată ce-am trecut tic pot, ea scade, fără ca asta să însemne că ne întoarcem pe vechiul drum. La urma urmei, longitudinea ia o valoare diferită de cealaltă parte a polului. În mod analog, dacă folosim ca parametru pentru timp volumului universului în cursul colapsării nu înseamnă că timpul se scurge invers. La fel ca în cazul longitudinii, trebuie pur şi simplu să folosim alţi parametri pentru a deosebi universul dinainte de dilatarea maximă de ce de după aceea. Cosmologia cuantică nu oferă deci argumente în favoarea inversiei temporale.

> *Toate scenariile sfârşitului lumii s-au dovedit a fi false profeţii. E drept că economia universală a fost pe punctul de a se prăbuşi, dar asta din cauza panicii iscate de asemenea predicţii. Cu mult timp în urmă,*

radiaţia de fond a undelor gravitaţionale a fost măsurată atât de fin, încât compoziţia universului era cunoscută suficient de precis pentru a-i calcula viitorul. După ce a încetat acceleraţia provocată de energia întunecată tranzitorie, expansiunea a încetinit şi s-a oprit, universul începând să colapseze. Nu s-a cunoscut momentul exact al încetării expansiunii, dar toate estimările au dat o valoare în intervalul a câteva decenii. La început nu părea să existe vreo primejdie, fiindcă trebuiau să treacă bilioane de ani până când universul să devină prea dens şi prea fierbinte pentru supravieţuire. Ba chiar întoarcerea la un univers mai fierbinte părea bine-venită.

Şi totuşi se auzeau tot mai multe voci care spuneau că acest punct-limită al expansiunii e sfârşitul lumii. În ciuda tuturor succeselor teoriei încovoierii, rămăseseră şi întrebări fără răspuns: Ce este de fapt timpul? Este avansul lui reversibil sau e legat de evoluţia universului? Vechile teorii legaseră direcţia timpului de expansiunea universului, postulând chiar redirecţionarea săgeţii timpului în universul aflat în colapsare. În acest caz, ne-am aminti viitorul şi am prezice trecutul. Afirmaţia se baza pe unele forme ale cosmologiei cuantice ale căror implicaţii erau minuscule la scara universului, aşa încât au fost prea puţin testate. Acum oamenii îşi aduceau vag aminte de posibilitatea îndepărtată a inversării săgeţii timpului – idee care, pesemne graţie caracterului ei ezoteric, s-a răspândit repede.

În aceste condiţii părea într-adevăr rezonabil să-ţi risipeşti toate economiile (cel puţin în limitele îngăduite de procesele vitale, artificial încetinite pentru supravieţuirea într-un univers rece şi diluat). Dacă direcţia

timpului urma să se schimbe curând, economiile, dobânzile, investiţiile şi fondurile îşi pierdeau sensul. Trebuia să-ţi cheltuieşti toţi banii şi să trăieşti din plin, o extravaganţă de care aveai să te bucuri iarăşi după inversia temporală. Mulţi au urmat acest principiu, în aşteptarea colapsării. Marile cheltuieli pentru consum au condus la un boom economic fără precedent. Dar, când expasiunea universului s-a oprit şi a început colapsarea, nu s-a produs nicio inversare a săgeţii timpului! Singura consecinţă cosmologică a fost că universul devenea, încet, dar inevitabil, tot mai fierbinte şi mai dens. Timpul curgea mai departe…

CAPITOLUL 8.
Cosmogonia.
Mituri şi metodologie

Nu *felul* în care sunt lucrurile în lume e mistic, ci *faptul* că ele există.

Ludwig Wittgenstein,
Tractatus logico-philosophicus

Economia era acum la pământ, în societate domnea haosul, fiindcă toate resursele erau în mâinile celor puţini care rezistaseră ispitei de a risipi. Civilizaţiile se consumau aşteptându-şi pieirea în arşiţa unui cosmos devenit tot mai strâmt. Economia şi-a revenit însă treptat după câteva miliarde de ani, graţie surplusului de energie într-un univers care se încălzea iar. Tehnologiile s-au readaptat, începând să producă bunuri până atunci necunoscute. Civilizaţiile puteau în fine să-şi folosească din plin cunoştinţele dobândite în trecutul îndepărtat. Puţinele neajunsuri din viaţa de zi cu zi erau cu uşurinţă înlăturate de maşinării sofisticate, iar energia nu mai era o problemă. A început o epocă de aur, în care omenirea aproape că nu mai avea nevoie să muncească, iar cultura şi ştiinţa au cunoscut o înflorire fără precedent.

Toate acestea se petreceau deşi se ştia bine că viaţa e finită şi perisabilă într-un univers care se îngustează. Oamenii au hotărât să-şi folosească toate resursele rămase ca un colac

de salvare culturală, în ideea cam arogantă că ceea ce ştiu ei ar putea fi important pentru univers – sau ceva în genul ăsta. Urmând exemplul legendarei capsule Kruskal, realizările culturale, împreună cu detaliile moleculare şi anatomice ale civilizaţiilor supravieţuitoare, au fost codificate într-un puternic semnal de unde gravitaţionale, pentru a-şi salva dacă nu viaţa, măcar gândurile în universul dens, până la sfârşitul timpului…

Odată ce cunoaşterea avansează spre o posibilă înţelegere a big bang-ului, tentaţia de a explica apariţia universului devine copleşitoare. Interpretările teoriilor şi ale soluţiilor lor matematice legate de întregi perspective asupra lumii devin într-adevăr fascinante, dar şi riscante, câtă vreme aceste teorii se află abia la începuturi. Fizica nu e însă singura preocupată de asemenea probleme, chiar dacă lăsăm deoparte filosofia, sora ei mai mare, aşa încât mi se pare interesant să comparăm diferitele perspective.

N-ar trebui subestimate miturile şi ce ne spun ele despre noi înşine şi despre progresele noastre. Să luăm drept exemplu Palatul de Vară din Beijing (figura 30), o minunată grădină construită pentru împărăteasa Dowager Cixi. Pe o insulă înconjurată de un lac artificial, în faţa Pagodei înmiresmate şi a Templului Mării de înţelepciune de pe Colina Longevităţii, se află Pavilionul îmbrăţişării Universului. E o clădire mică, în stilul epocii, cu marginile acoperişului înălţându-se semeţ spre cer. Pavilionul îmbrăţişării Universului ne spune tot ce trebuie să ştim despre omenire şi lume. Iniţial a fost numit Pavilionul Broaştei Lunare, pentru că de-acolo se observa răsăritul Lunii.[ZZ]

Deseori se întâmplă să găsim paralele între idei provenind din tradiţii cât se poate de diferite, ceea

ce se explică prin faptul că imaginaţia omenească e totuşi limitată. Analogiile prezentate cu titlu de exemplu în acest capitol nu vor să sugereze relaţii stricte între diversele abordări; cu toate asemănările lor superficiale, aceste idei se deosebesc când intrăm în detalii, ca să nu mai vorbim de mesajele lor.

Hall of Embracing the Universe (Hanxu Tang)
Originally a three-storey building named 'Hall for Watching the Moon Toad' completed in Emperor Qianlong's reign (1736-1795), the hall was rebuilt with just one floor during the reign of Emperor Jiaqing. It became a wonderful place for emperors and empresses to enjoy the moonlight during summer and autumn evenings. From here Emperor Qianlong watched naval maneuvers of the Tough and Sharp Regiment of the Fragrant Hills. Burned down by the Anglo-French Allied Forces in 1860, the hall was rebuilt during Emperor Guangxu's reign (1875-1908). Empress Dowager Cixi also sat here to watch Naval Academy maneuvers

Figura 30. *Pavilionul Îmbrăţişării Universului din Palatul de Vară din Beijing.*

Analogii:
Asemănări înşelătoare

Analogiile nu dovedesc nimic, dar ele ne pot face să ne simţim mai în largul nostru.

Sigmund Freud, *Introducere în psihanaliză*

Scenariile naşterii lumii au jucat un rol similar cu cel al atomismului. După cum se ştie, conceptul de atom a fost introdus cu 2500 de ani în urmă de filosofii presocratici Leucip şi Democrit, pentru a fi confirmat de fizicieni abia în secolul XX. În paranteză fie spus, în acelaşi an, 1905, Einstein a publicat şi teoria specială a relativităţii, şi ipoteza fotonului. Atât în reprezentările antice, cât şi în cele moderne, atomii, corpuri indivizibile, sunt consideraţi cărămizile elementare din care e alcătuită materia. Dar detaliile şi scopurile teoriei presocratice a materiei se deosebesc mult de cele ale conceptului fizic întemeiat pe observaţii, chiar dacă ignorăm faptul că atomii din fizică sunt divizibili, după cum s-a văzut în secolul XX. Atomiştii şi-au elaborat conceptul ca răspuns la afirmaţia şocantă a lui Parmenide că orice mişcare trebuie să fie o iluzie. Parmenide a ajuns la această teză în mod manifest absurdă prin câţiva paşi logici, pornind de la afirmaţia că nimicul nu există. De aici rezultă că nu poate exista nicio mişcare, fiindcă ea ar presupune ca obiectele să ocupe poziţii acolo unde înainte s-a aflat nimicul. La această contradicţie logică, susţinută şi de Zenon, atomiştii au răspuns acceptând existenţa spaţiului gol prin care se mişcă atomii ce alcătuiesc materia.

Apariţia conceptului de atom în fizica modernă n-are nicio legătură cu asemenea dezbateri

filosofice. Astăzi folosim reprezentări şi imagini directe, ca în microscopia prin efect tunel, care arată cum e constituită materia din atomi individuali, dar în fizică s-a ajuns la conceptul de atom, cu mai mult timp în urmă, prin observaţii indirecte. În altă celebră lucrare din 1905, Einstein a explicat mişcarea browniană – agitaţia unor particule mici, cum sunt cele de polen, aflate în suspensie într-un lichid – prin ciocnirile cu moleculele lichidului. În anii care au urmat, conceptul de atom s-a impus, dar a mai trebuit să treacă o jumătate de secol până când Erwin Müller de la Universitatea din Pennsylvania să ofere primele imagini ale atomilor, folosind propria sa invenţie, microscopia ionică cu efect de câmp de (figura 31).

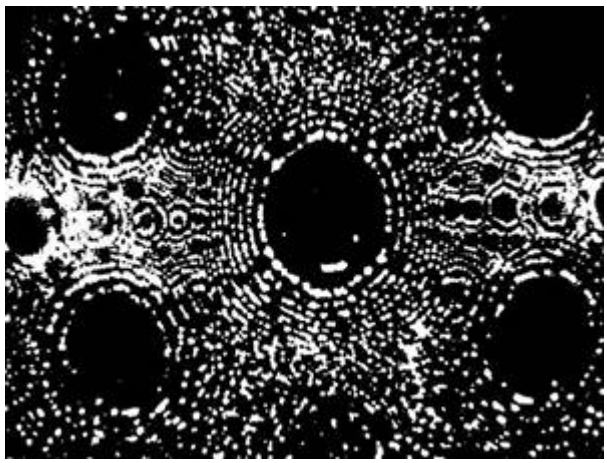


Figura 31. *Vârful unui ac de tungsten într-un microscop ionic cu efect de câmp pune în evidenţă structura atomică.*

Situaţia reprezentărilor privind apariţia lumii e asemănătoare. De-a lungul istoriei au fost făcute multe propuneri, deseori împodobite cu detalii precise. De la o vreme, fizica începe să răspundă la asemenea întrebări, iar metodele ei au fost încununate de succes: observaţii fine, deşi uneori indirecte, sunt în acord cu o solidă bază teoretică. În comparaţie cu dezvoltarea conceptului de atom, fazei în care ne aflăm îi lipseşte o imagine directă, şi e îndoielnic că vom ajunge vreodată la o

imagine directă a începutului lumii. De o asemenea imagine cel mai mult se apropie acum cea a radiaţiei cosmice de fond, datând de la scurt timp după big bang, dar o imagine a big bang-ului, ca să nu mai vorbim de una a universului precedent, rămâne o fantezie, date fiind densitatea şi proprietăţile cuantice ale acestei faze. Totuşi, la fel cum observaţiile indirecte ale mişcării browniene au venit în sprijinul conceptului de atom, am putea pătrunde pesemne în istoria veche a universului prin măsurători fine ale radiaţiei cosmice de fond sau ale altor forme de radiaţie. N-am ajuns deocamdată acolo, însă teoriile actuale ne permit să facem speculaţii.

Miturile:
Viaţa universală

Oamenii se duc acolo după ce mor!
Fată din India

Când clasificăm miturile creaţiei, facem distincţia dintre creaţia primară şi creaţia secundară – distincţie ilustrată de figura 32.

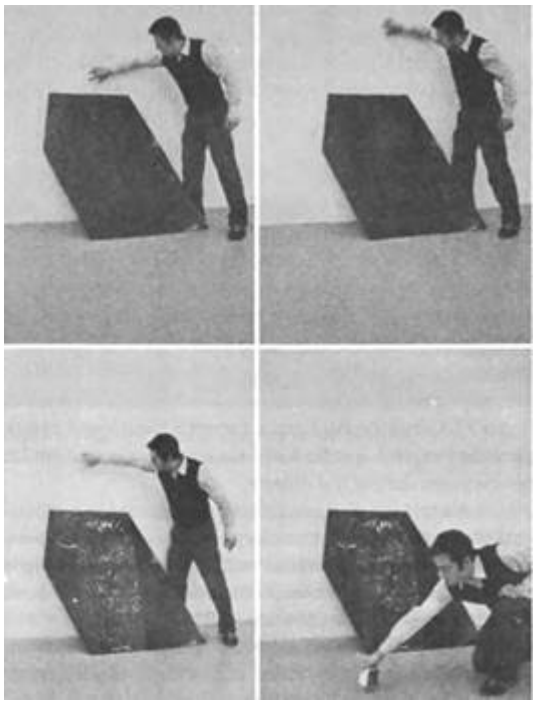


Figura 32. *Creaţie primară şi secundară: actul creaţiei primare este ideea artistului şi înţelegerea ei. Odată încheiată creaţia primară, creaţia secundară are loc mult mai uşor şi aproape automat (aici, prin zgârierea zidului alb de deasupra plăcii de marmură), care conduce la formarea unei structuri.* (Dispositivo per creare spazio [Dispozitiv pentru crearea spaţiului], *2007. Idee şi realizare: Gianni Caravaggio. Fotografie de Paul Andriesse.)*

Creaţia primară explică apariţia lumii înseşi, creaţia secundară explică apariţia lumii aşa cum o

vedem acum. Ele pot coincide, dar pot fi şi diferite.

Creaţia primară şi cea secundară sunt identice în perspectivele liniare asupra lumii, care încep cu un moment al creaţiei şi avansează continuu, culminând eventual cu un sfârşit apocaliptic. Acest scenariu e bine cunoscut din tradiţia creştină, dar poate fi întâlnit şi în culturile Chinei.

Mai frecventă e separarea dintre cele două creaţii, rezultând de regulă din perspective ciclice. În hinduism, de pildă, lumea a fost la început creată de Brahma, eveniment urmat de mai multe cicluri de distrugere şi re-creare. Distrugerea şi crearea sunt indisolubil legate una de alta, şi ambele se află în puterea zeilor. Un exemplu este explicaţia pentru care Ganesha are cap de elefant (figura 33)[78].

Figura 33. *Ganesha, cu un fildeş intact şi celălalt rupt.*

Ganesha e fiul lui Shiva şi al lui Parvati, zeu şi zeiţă care duc o viaţă de familie neobişnuită. Într-o bună zi, în timp ce Shiva e plecat pentru mai multă vreme, Parvati îl naşte pe Ganesha, care creşte repede, devenind un zeu puternic, întors acasă, Shiva îl vede pe acest tânăr necunoscut păzind casa din însărcinarea lui Parvati. Plin de curaj, Ganesha îl împiedică pe Shiva să intre în propria

lui casă, pentru a fi decapitat în lupta care urmează. Sosind prea târziu, lui Parvati nu-i rămâne decât să-i spună lui Shiva că tocmai şi-a mutilat propriul fiu şi că nu-i va permite să intre în casă până nu-şi repară greşeala. Shiva priveşte împrejur, iar prima fiinţă pe care o vede e un elefant, al cărui cap îl pune pe umerii lui Ganesha. (Deşi zeu, se pare că Shiva nu poate călători înapoi în timp pentru a evita lupta – iată o probă în discuţia de mai sus despre săgeata timpului!)

În plus faţă de asemenea ilustrări pitoreşti ale puterilor divine, găsim descrieri detaliate ale evoluţiei de la o creaţie secundară la distrugerea următoare. Sunt date chiar şi duratele ciclurilor în ani, fără să ni se spună cum sunt obţinute. Spre deosebire de ornamentele tipice culturii indiene, un simbol, svastica, se distinge prin simplitatea şi caracterul lui abstract. Ca formă stilizată a roţii, simbolizează progresul ciclic al lumii şi direcţia timpului.

Este bine cunoscută legătura dintre perspectiva ciclică şi reîncarnare sau, mai general, o existenţă pământească după moarte. Întâmplarea următoare e grăitoare în acest sens. După o conferinţă desfăşurată în apropiere de Roorkee, la vreo sută de kilometri nord de Delhi, doi studenţi indieni şi cu mine am hotărât ca în cele trei zile râmase până la plecare să facem o excursie în Himalaya. Vorbind cu oamenii de ştiinţă cunoscători ai regiunii, ne-a încolţit în minte ideea vagă a unui tur de-a lungul Gangelui. Cu transportul public rudimentar, pe un drum de munte ca vai de lume, călătoria n-a decurs prea lin, dar, după o zi şi jumătate, am ajuns totuşi la Joshimath, nu departe de Gangotri, gheţarul de unde izvorăşte Gangele. La început am urcat cu telecabina până într-un loc de unde se vedeau crestele munţilor uriaşi care ne înconjurau. Înainte să se încheie ziua, am vrut să coborâm prin valea Gangelui, unde aveam de

escaladat doar o creastă minusculă în comparaţie cu munţii cei înalţi.

Ne-am întors în sat şi l-am străbătut pe o potecă şerpuitoare, de unde nu puteam vedea Gangele, ci doar panta descendentă din faţa noastră. Împrejurimile îmi aminteau de Alpi, deşi trecuserăm prin locuri exotice – printr-o pădure cu arbori uriaşi acoperiţi de licheni, prin zăpada înmuiată de soarele lui martie, în timp ce deasupra noastră zburau fluturi albi. În vale am trecut pe lângă vaci care rumegau pe marginea drumului şi pe lângă grupuri de copii care se opreau o clipă din joacă pentru a-l privi pe exoticul (pentru ei) occidental.

Figura 34. *Valea Gangelui la Joshimath.*

Am observat un grup de fete îmbrăcate în haine viu colorate, care stăteau de vorbă pe acoperişul

unei case. Rakesh, unul din însoţitorii mei, s-a întors spre cea mai mare dintre ele ca să se intereseze de drumul spre fluviu – în hindi, fiindcă engleza nu prea e folosită în regiune, aşa că n-am înţeles despre ce vorbeau cu atâta însufleţire. Rakesh mi-a relatat apoi surprinzătoarea lor conversaţie. Fata nu înţelegea de ce voiam să coborâm la fluviu, pentru ca, după mai multe schimburi de replici, să spună: „Oamenii se duc acolo după ce mor!”

Înţelesul acestei exclamaţii era misterios nu numai pentru mine, dar şi pentru tovarăşii mei de drum, buni cunoscători ai hinduismului. Să fi fost o farsă jucată străinilor? Sau o poveste înspăimântătoare spusă de părinţi pentru a-şi împiedica copiii să pornească într-o coborâre periculoasă spre fluviu? Dar nu cumva tocmai asta i-ar incita pe aventuroşi? Mergând pe potecă, ne tot gândeam la afirmaţia fetei, atât de enigmatică şi, în acelaşi timp, absolut sinceră. La un moment dat, râul a rămas în spatele orizontului pantei. Se înnsera, norii acopereau crestele. Prognoza meteo spunea că urma să plouă seara, iar noi ne temeam că a doua zi drumurile vor fi rele şi autobuzul nu ne va aduce la timp la Delhi, de unde urma să luăm trenul sau avionul pentru a ne întoarce acasă. Întunericul a făcut ca tot drumul să nu vedem nimic din acel Styx indian. La fel de misterioasă a rămas pentru noi semnificaţia cuvintelor rostite de fata din Joshimath. Ele simbolizau însă ideea de ciclicitate – o existenţă pământească după moarte împletită cu peisajul acelor locuri.

Multe alte culturi adoptă perspectiva ciclică, ceea ce nu e de mirare dacă ţinem cont de forma ciclică a majorităţii fenomenelor, cum e succesiunea zi-noapte, şi influenţa lor asupra naturii şi asupra culturilor mai vechi sau mai noi. Trecerea de la zi la noapte şi parcursul soarelui au jucat un rol important în Egiptul antic, unde zeul soarelui călătorea pe cer ca pe mare, iar în fiecare

noapte trebuia să înfrunte mari primejdii pentru a putea răsări a doua zi. Nu era deci exclusă ideea că ciclul diurn s-ar putea sfârşi la un moment dat, ca într-o singularitate. Şi în cosmologia egipteană se vorbea despre o primă creaţie, urmată de nenumărate cicluri. Mai mult, cultura egipteană depindea în mod critic de revărsările periodice ale Nilului, Asemenea elemente vitale pătrund cu uşurinţă într-o perspectivă abstractă asupra lumii. Alte exemple sunt întâlnite pe continentul american, de pildă la mayaşi şi azteci, care îşi alcătuiau calendare în formă de disc, astfel încât cursul ciclic să fie manifest (figura 35).

Figura 35. *Calendar maya în formă de disc.*

La începuturile culturii europene, conceptele ciclice au jucat de asemenea un rol esenţial, în ciuda învăţăturilor creştine, în care cosmogonia urma un curs liniar. Filosofia şi ştiinţa occidentale s-au născut în Grecia presocratică şi au fost apoi puternic influenţate de presocratici. Hesiod vorbise despre cele patru vârste ale omenirii, perspectivă evident ciclică. Mai mult, găsim urme ale ideii de timp discret la Cronos secerătorul, care, la fiecare tăiere, scurtează firul vieţii cu o cantitate fixă (figura 36).

Asemenea mituri au influenţat filosofia presocratică atunci când aceasta a început

elaborarea unei perspective logice asupra lumii. Ne-am întâlnit deja cu reprezentarea statică a lui Parmenide, care, negând posibilitatea oricărei schimbări, nu e nici liniară, nici ciclică. Aproape toate punctele de vedere imaginabile pot fi însă găsite la ceilalţi presocratici, de care ne vom ocupa în secţiunea următoare.

Figura 36. *Cronos (sau Saturn) înfăţişat cu o seceră, care simbolizează avansul discret al timpului, şi cu o cruce care întregeşte simbolul astronomic al planetei Saturn.*

Se spune adesea că diferenţele dintre perspectivele predominant liniare şi cele predominant ciclice sunt corelate cu structura socială a culturilor. Perspectivele ciclice corespund unei tendinţe spre fatalism, din moment ce înaintarea ciclică a timpului n-ar recompensa eforturi deosebite. Eterna reîntoarcere l-a preocupat şi pe Nietzsche – din alte motive, mai sumbre. Dimpotrivă, conceptele liniare sunt uneori asociate cu încurajarea inovaţiei. Această interpretare poate fi întâlnită în massmedia, de pildă în articolele despre industria software indiană, care foloseşte cu multă măiestrie tehnologiile existente, dar se spune că elaborează mai greu noi tehnologii. Ideea asta am auzit-o pentru prima dată de la un coleg indian marcat de spirit autocritic, care putea el însuşi sluji drept contraexemplu la această generalizare pripită, după

cum numeroase alte exemple conduc la concluzia contrară. În Europa, de pildă, începuturile filosofiei, care influenţează şi azi discursul intelectual, au fost însoţite de perspective predominant ciclice asupra lumii, iar, ulterior, tradiţia creştină liniară n-a putut contracara paralizia în dezvoltarea ştiinţelor din Evul Mediu, pe care de fapt ea însăşi a provocat-o.

Teoriile:
Lumea din mintea unui om

Trezeşte-te! (Nu Greciei îi spun – ea *este* trează.)

Lord Byron

În Antichitate, cu greu poţi deosebi miturile de teoriile filosofice sau ştiinţifice. De pildă, la Thales (pe la 580 î.Cr.) întâlnim ideea că apa e elementul fundamental, ceea ce o diferenţiază de celelalte trei elemente. Importanţa ideii lui Thales nu stă atât în conţinutul ei, cât în faptul că a iniţiat un lung lanţ de ipoteze, care s-au rafinat rapid şi s-au stimulat reciproc la filosofii care i-au urmat. Găsim surprinzător de multe elemente ale cosmologiei moderne în această listă impresionantă de idei.

Filosofia presocratică:
Durerile naşterii cosmologiei

La doar câţiva ani după Thales, Anaximandru face un pas imens spre abstracţiune: originea lumii se întemeiază nu pe un element concret, ci pe „nedefinit”[79] (*apeiron*). Mai mult, vedem aici şi ideea de simetrie, fiindcă, pentru Anaximandru, nedefinitul este lipsit de structură, deci se află în echilibru. Doar în cursul evenimentelor lumii se formează structurile, dar în cele din urmă lumea se întoarce la starea ei iniţială nedefinită: „Începutul lucrurilor este *apeiron*-ul. … De acolo de unde se produce naşterea lucrurilor, tot de acolo le vine şi pieirea, potrivit cu necesitatea …”[80]. Această formulare oferă numeroase elemente de bază ale unei perspective ciclice asupra lumii, la fel ca în cosmologia cuantică modernă.

Rolul simetriei – înţeleasă aici prin faptul că starea iniţială e lipsită de structură – e important pentru că poate conduce la mari simplificări în soluţiile comportamentului general, lată ce spune Aristotel despre ideea lui Anaximandru de absenţă a structurii: „Într-adevăr, pentru ceea ce se află plasat în centru şi este raportat în chip egal faţă de extremităţi, nu se cuvine să se mişte fie în sus, fie în jos, fie într-o parte. Totodată îi este imposibil să se mişte în direcţii contrare, astfel încât, în mod necesar, stă pe loc.” Acest raţionament aminteşte de argumentele de simetrie folosite adesea în fizica teoretică. Putem, de pildă, rezolva o ecuaţie diferenţială complicată, cu o condiţie iniţială omogenă, lipsită de structură, iar la urmă să aflăm că soluţia e statică, dar e mult mai simplu să recunoaştem simetria şi, la fel ca Anaximandru şi Aristotel, de la bun început să nu găsim niciun

motiv pentru mişcare. Asemenea argumente legate de simetrie, deseori în forme mai complicate, joacă un rol important în fizică.

La vreo şaptezeci de ani după Thales, *devenirea* s-a aflat în centrul filosofiei lui Heraclit: „Nu văd nimic altceva decât devenirea. Nu vă lăsaţi înşelaţi! În ochiul vostru care nu răzbate departe, şi nu în esenţa lucrurilor, stă vina dacă veţi crede că vedeţi undeva pământ ceva ferm în marea devenirii şi a petrecerii."[81] Cosmologia modernă a ajuns să-şi reprezinte transformarea la scară mare a universului doar prin observarea directă a expansiunii lui, dată de vitezele stelelor din galaxiile îndepărtate, Până şi Einstein s-a înşelat la început şi a încercat să găsească o soluţie statică în relativitatea generală, introducând aşa-numita *constantă cosmologică,* pentru a renunţa la ea atunci când Edwin Hubble a descoperit că universul e în expansiune. Abia recent constanta cosmologică a revenit în actualitate, în modele care încearcă să explice energia întunecată.

La Heraclit, perspectiva ciclică asupra lumii capătă un sens strict – el vorbeşte despre existenţa mai multor cicluri. Apoi, la fel ca Thales, el găseşte că unul dintre cele patru elemente este cel fundamental – focul, care distruge periodic lumile şi le permite să renască în conflagraţie: „Această lume, aceeaşi pentru toţi, n-a făurit-o nici vreunul din zei, nici vreunul din oameni. Ea a fost întotdeauna, este şi va fi un foc veşnic viu, care după măsură se aprinde şi după măsură se stinge." Heraclit este cel care a introdus ideea de conflagraţie *(ekpyrosis),* preluată apoi de stoici. Ea avea să revină în cosmologia modernă prin modelul ecpirotic, bazat pe teoria corzilor şi susţinut de Justin Khoudry, Burt Ovrut, Paul Steinhardt şi Neil Turok.

Perspectiva lui Parmenide este, după cum am văzut, diametral opusă: orice schimbare e o iluzie. Nimic nu apare, nimic nu dispare, ci totul există

pur şi simplu. Motivul este de natură logică, pentru că fiinţa nu poate apărea din nefiinţă: „[…] nu se poate, într-adevăr, spune şi nici gândi că ceea ce nu este este. Şi-apoi ce nevoie ar fi putut-o face – ivită din nimic – să se nască mai târziu ori mai devreme? Aşa că trebuie neapărat să credem că este întru totul, ori că nu este. Şi iarăşi niciodată tăria convingerii nu va încuviinţa că din nefiinţă se poate naşte altceva decât nefiinţă.” La fel şi în fizică, începutul şi sfârşitul tuturor lucrurilor există cel mult sub forma singularităţilor, în afara oricărei teorii şi a oricărei logici.

O jumătate de secol mai târziu, Empedocle calcă pe urmele lui Parmenide, dar adaugă noi elemente. Relaţia dintre ei e clară, de pildă în aceste versuri: „Căci din ce nu există nu poate ceva să se nască. / Cu neputinţă-i, la fel, ca ceea ce este să piară […]” Pornind de la această idee, el ajunge la o perspectivă ciclică asupra evoluţiei lumii: „Astfel, este ştiut că Unul se naşte din multe / Iarăşi apoi, împărţindu-se Unul, mai multe creează, / Astfel se nasc toate acestea şi Veacul nu-i fără capăt. / Alteori între ele schimbându-se fără-ncetare, / Nu sfârşesc niciodat’, ci rămân ele veşnic aceleaşi, / Imuabile-n cerc.” Ceea ce aduce nou Empedocle este ideea că interacţia dintre două forţe opuse e necesară pentru un echilibru stabil, căci armonia şi dezbinarea sunt veşnice, iar el le extrapolează din domeniul uman în cel al cosmologiei – intuind astfel un ingredient esenţial al fizicii moderne.

Cu puţin înainte de Empedocle, Anaxagora a venit cu o teorie asupra formării structurilor. La fel ca la Anaximadru, starea iniţială este omogenă: „[…] toate lucrurile erau laolaltă, nesfârşite cantitativ şi ca micime. Căci şi micimea era nesfârşită. Şi toate laolaltă fiind, nimic nu era evident din pricina micimii.” Lumea a început deci dintr-o stare iniţială cu o simetrie înaltă şi extrem de simplă, nestructurată. Problema crucială e aceeaşi ca în cosmologia modernă: cum pot apărea

structuri precum galaxiile şi stelele dintr-o asemenea stare simetrică? Trebuie găsită o cauză pentru o dinamică atât de complicată, iar la Anaxagora aceasta e spiritul [*Nous*]: *„Nous* domină toate câte au suflet, fie mai mari, fie mai mici. *Nous* dirijează şi toată rotaţia cosmică, astfel că el este factorul iniţial al acestei rotiri. Mai întâi el a început să producă rotirea într-un spaţiu redus. Aceasta s-a întins mai departe, şi învârtirea a cuprins spaţii tot mai mari. De toate a avut cunoştinţă *Nous:* de lucrurile amestecate, de cele despărţite şi divizate. Toate le-a orânduit *Nous:* cele ce erau să fie şi cele ce au fost, cele ce nu există acum şi cele ce sunt acum şi vor fi […]"

Lăsând la o parte puternicul determinism, această reprezentare seamănă bine cu formarea inflaţionară a structurilor, presupunând o stare iniţială de vid amorfă, din care apar structurile prin fluctuaţii cuantice. Pentru apariţia structurilor e esenţială teoria cuantică, înlocuind acel *Nous* al lui Anaxagora. Este de observat aici că unii fizicieni, între care Eugene Wigner, au atribuit conştiinţei un rol important în procesul de măsurare din mecanica cuantică, şi anume în colapsarea funcţiei de undă. Astfel, funcţia de undă colapsează atunci când conştiinţa (unui experimentator sau a unui observator) acţionează asupra sistemului cuantic.

Astăzi însă, această opinie e împărtăşită doar de o minoritate, iar mai ales în cosmologie e îndoielnică. Conform ei, ar trebui ca funcţia de undă a radiaţiei cosmice de fond, care a apărut în vidul iniţial, să fi colapsat doar acum câteva decenii, când Amo Penzias şi Robert Wilson au măsurat-o din pură întâmplare. (Asta dacă nu cumva alte forme de viaţă din univers au luat-o înaintea omenirii, provocând colapsarea ei mai devreme.) Dar radiaţia cosmică de fond a jucat un rol esenţial în universul timpuriu, şi dacă funcţia ei de undă nu ar fi fost pe-atunci colapsată, ar fi interacţionat altfel cu materia, iar procesul de

formare a structurilor ar fi arătat diferit. Dacă e nevoie de o conştiinţă pentru colapsarea funcţiei de undă, nu ne rămâne decât să conchidem că în acele momente o materie conştientă de sine trebuie să fi efectuat observaţii – adică să facem o presupunere cu totul hazardată doar pentru a salva interpretarea lui Wigner.

La Parmenide, nu doar imaginea asupra cosmosului e interesantă, dar şi consecinţa indivizibilităţii dedusă de el pe acelaşi temei ca şi caracterul iluzoriu al mişcării: „Nici divizibilă nu-i, pentru că e toată la fel: niciunde nu se află un mai mult ori un mai puţin în stare să-i împiedice continuitatea, ci toată e plină de fiinţă. În felul acesta, e în întregime continuă: [înlăuntru-i] fiinţa se mărgineşte cu fiinţa." După cum am văzut, Zenon a încercat să vină în apărarea ipotezei lui Parmenide, dar contradicţia cu observaţiile privind evidenta transformare era flagrantă.

Această dilemă i-a îndemnat pe atomişti, mai cu seamă pe Leucip (discipolul lui Zenon, care, la rândul lui, fusese discipolul lui Parmenide) şi pe Democrit (ceva mai tânăr) să analizeze sistematic premisele lui Parmenide. Mişcarea trebuia să fie posibilă, aşa încât atomiştii au tras în cele din urmă concluzia că ceea ce există e divizibil. În cazul acesta, fiinţa se putea mărgini cu nefiinţa, iar mişcarea devenea posibilă. În termeni moderni, am spune că avem de-a face cu mişcarea atomilor în spaţiul gol.

În felul acesta, presocraticii au pus întrebări care şi-au găsit răspunsul milenii mai târziu, în fizica modernă, de pildă prin studiile lui Einstein asupra mişcării browniene. Problema pe care totuşi filosofii presocratici nu şi-au pus-o a fost cea legată de indivizibilitatea nelimitată a spaţiului şi timpului. Pentru aceasta era nevoie de schimbarea radicală de perspectivă adusă de relativitatea generală, care atribuie un rol fizic spaţiului-timp.

Altminteri, găsim la presocratici majoritatea elementelor cosmologiei moderne. Abia odată cu gravitaţia cuantică au intrat în joc elemente cu adevărat noi. Ea aşază pe baze ştiinţifice posibilitatea existenţei unor limite în divizarea spaţiului şi timpului, iar de aici, prin evitarea singularităţilor din relativitatea generală, ajunge la o perspectivă ciclică asupra lumii.

Ceea ce se întâmplă la scară mare e determinat de interacţia dintre atracţia clasică a gravitaţiei şi repulsia la scară mică, din gravitaţia cuantică. Ideea în sine nu e neapărat nouă în raport cu ce gândeau presocraticii. Ce e nou aici este faptul că structura atomică a spaţiului şi timpului reprezintă cauza fizică a fenomenului. Gravitaţia cuantică face cu putinţă calcule explicite, detaliate; ele nu numai că înfrumuseţează tabloul general şi l-ar putea face într-o bună zi testabil, dar ar putea conduce şi la descoperirea unor fenomene cu totul noi. Cel mai frapant exemplu e pesemne *uitarea cosmică,* ducând la un amestec al perspectivei liniare cu cea ciclică, în care sfârşitul fiecărui ciclu e privit ca un nou început.

Cosmologie fizică:
Evoluţie ciclică

Ştiinţa a început să se ocupe de problemele cosmologice relativ târziu, odată cu observarea stelelor şi galaxiilor îndepărtate şi cu apariţia relativităţii generale. La puţin timp după stabilirea ecuaţiilor lui Einstein, el însuşi, apoi Willem de Sitter în 1917, iar mai târziu Aleksandr Friedmann şi Georges Lemaître au găsit soluţii simple care descriau evoluţia în timp a unui univers izotrop la scară mare. Pe atunci nu se ştia nimic despre expansiunea universului, aşa încât oamenii de ştiinţă căutau soluţii care să corespundă unui ansamblu static de mase, ceea ce s-a dovedit însă a fi extrem de dificil, şi a devenit posibil doar când Einstein a introdus în ecuaţii un termen suplimentar, constanta cosmologică.

Tot cam pe la acea vreme, astronomi precum Vesto Slipher au început să observe că majoritatea obiectelor cereşti numite *nebuloase* – care emit, spre deosebire de stele, o lumină difuză – păreau să se îndepărteze de noi. Nu era pusă în evidenţă mişcarea în sine, dar spectrul luminii nebuloaselor prezenta o deplasare spre roşu. Este vorba aici de un analog al efectului Doppler din acustică, cel care face ca sirena unei ambulanţe ce se îndepărtează de noi să sune altfel decât dacă ambulanţa se apropie sau stă pe loc. În mod asemănător, frecvenţa unei surse de lumină care se îndepărtează se deplasează spre capătul roşu al spectrului. Fuga aceasta a nebuloaselor era inexplicabilă – ce fel de forţe acţionau asupra lor, dar nu şi asupra celorlalte stele?

Misterul a fost lămurit în 1929 de Edwin Hubble, care a reuşit să determine distanţele până

la nebuloase. La fel ca în mai recentele observaţii ale expansiunii accelerate cu ajutorul supernovelor, Hubble a apelat la surse de lumină standard a căror strălucire reală – cea pe care am vedea-o în apropierea stelei – poate fi dedusă din alte proprietăţi. Din moment ce strălucirea percepută pe Pământ scade cu distanţa până la obiect, diferenţa dintre strălucirea reală şi cea observată ne permite să calculăm această distanţă. Pentru Hubble, sursele standard de lumină nu erau supernovele, ci cefeidele, stele variabile pentru care Henrietta Leavitt descoperise o relaţie între strălucirea lor şi frecvenţa pulsaţiei. Hubble a găsit numeroase cefeide în unele nebuloase cunoscute, iar din frecvenţa pulsaţiei a determinat întâi strălucirea lor reală, iar apoi distanţa până la nebuloase – şi, spre surprinderea lui, a găsit că ele se află mult în afara Căii-Lactee. Prin urmare, nebuloasele sunt difuze pur şi simplu pentru că sunt alcătuite din nenumărate stele aflate foarte departe de noi. Nebuloasele sunt de fapt galaxii de sine stătătoare.[82] Prin observaţiile lui, Hubble a extins universul cunoscut mult dincolo de graniţele Căii-Lactee.

În plus, problema fugii nebuloaselor era acum rezolvată prin descoperirea faptului că obiectele îndepărtate se deplasează mai repede decât cele apropiate. Hubble a găsit că viteza de îndepărtare şi distanţa sunt proporţionale. Concluzia deloc flatantă că suntem atât de nesuferiţi în univers, încât până şi galaxiile fug de noi poate fi lesne demontată dacă presupunem o expansiune uniformă a întregului univers, a spaţiului însuşi. Galaxiile nu se îndepărtează de noi sau de vreun alt punct, dar spaţiul dintre noi şi ele se extinde. Segmentele de dreaptă care unesc Pământul cu toate galaxiile cresc cu acelaşi factor, ceea ce face ca lungimea lor să fie proporţională cu distanţa. Mai mult, observaţiile s-au dovedit a fi în acord calitativ cu soluţiile cosmologice ale relativităţii

generale – iar asta fără să fie nevoie de o constantă cosmologică. (Abia observaţiile extrem de precise din ultimii ani au pus în evidenţă, după cum am spus, o acceleraţie a expansiunii provocată de energia întunecată, ceea ce presupune existenţa unui soi de constantă cosmologică.) Teoria devenea credibilă chiar şi atunci când se aplica unor asemenea distanţe uriaşe. În felul acesta s-a născut cosmologia modernă.

Soluţiile puneau însă o problemă delicată: propagându-le înapoi în timp, toate conduceau la valori infinite pentru densitatea materiei cu un timp finit în urmă, un timp când tot spaţiul se reducea la un punct. În acest punct, ticăloasa singularitate, ecuaţiile lui Einstein îşi pierdeau sensul; punctul ieşea din graniţele fizicii descrise de teorie. S-au făcut deseori încercări de a interpreta singularitatea ca punct de origine a universului, dar, întemeiate doar pe teoria clasică, asemenea concluzii sunt deplasate. Singularitatea ne arată limpede că teoria nu poate fi aplicată în acel punct.

Doar o extindere a teoriei poate fi de folos aici, permiţându-i în continuare să descrie soluţii ale expansiunii, fără să ajungă însă la singularităţi. Numai o asemenea teorie ne poate spune dacă momentul singularităţii clasice joacă rolul de punct iniţial, sau dacă timpul fizic se întinde dincolo de singularitate – înainte de big bang. De la începuturile sale, teoria cuantică a fost privită ca o componentă esenţială a extinderii relativităţii generale, dar complicaţiile de ordin matematic au încetinit mult procesul. Primele versiuni ale cosmologiei cuantice au arătat cum ar putea exista un început nesingular, însă proprietăţile singularităţii ca frontieră temporală nu au fost studiate; fizicienii încercau doar să escamoteze problema, plasând comportamentul singular în spatele incertitudinii din teoria cuantică. Asemenea idei au apărut în anii ’80, pe de o parte la Jim

Hartle şi Stephen Hawking, pe de alta, în cadrul unor modele diferite, la Alex Vilenkin, dar despre toate acestea vom vorbi în capitolul următor.

Au fost propuse, în mod independent, o serie de perspective parţial ciclice, postulându-se că în faza big bang a existat un anumit comportament al materiei. În anii ’30, pe când Marea Criză le amintea tuturor că nu poate dura la infinit creşterea economică, Richard Tolman a fost primul fizician care a studiat posibilitatea universurilor ciclice, expansiunea urmând contracţiei şi tot aşa. Cercetările lui, mai cu seamă cele asupra rolului creşterii dezordinii şi entropiei într-un univers ciclic, continuă şi în ziua de azi să-i inspire pe fizicieni. După Tolman şi Marea Criză, deceniile următoare – din anii ’40 până în anii ’60 – au reprezentat apogeul keynesianismului, teoria care spune că intervenţia guvernului poate încuraja economia să se extindă la nesfârşit.[83] În acei ani s-a impus în cosmologie modelul big bang, Alpher şi Herman au publicat primele rezultate privind radiaţia cosmică de fond, care a fost în cele din urmă descoperită de Penzias şi Wilson. Speranţele legate de o creştere economică nelimitată au fost spulberate de criza petrolului din anii ’70, dar în 1979, Mario Novello şi Jose Salim, iar independent de ei V. Melnikov şi S. Orlov, au propus un mecanism concret prin care universul se poate extinde iarăşi după o depresie cosmică. Aceste idei au fost folosite şi duse mai departe de Ruth Durrer şi Joachim Laukenmann, precum şi de Patrick Peter şi Nelson Pinto-Neto în anii ’90 şi mai târziu, conducând la scenarii în care structurile pot apărea fără să fie nevoie de presiunea negativă care trebuie să fie prezentă într-o fază inflaţionară. Majoritatea cercetărilor s-au concentrat însă asupra celor mai simple universuri izotrope, şi s-ar putea ca, din cauza proprietăţilor speciale presupuse, să nu fie general valabile. Şi în teoria corzilor au apărut perspective ciclice, prin cercetările lui

Gabriele Veneziano şi, mai recent, ale lui Paul Steinhardt şi Neil Turok, fără a fi însă pe deplin susţinute. În momentul când scriu aceste rânduri, fatalele modele ciclice sunt privite iarăşi cu interes – iar lumea se zbate iarăşi într-o criză financiară.

Odată cu naşterea gravitaţiei cuantice cu bucle, a apărut o nouă posibilitate de a ataca problema. Deşi deocamdată e incompletă, avem o teorie cuantică a gravitaţiei independentă de presupunerea izotropiei cosmice. Găsirea soluţiilor concrete rămâne foarte complicată, dar, începând din anul 2000, cosmologia cuantică cu bucle ne ajută să deducem consecinţe ale teoriei cuantice asupra modelelor cosmologice. După cum am arătat deja, ea elimină singularitatea big bang graţie caracterului discret al timpului. De fapt, eliminarea singularităţii n-a fost de la bun început obiectivul gravitaţiei cuantice cu bucle sau al cosmologiei cuantice cu bucle, ci a rezultat din construcţii şi calcule matematice laborioase şi a devenit vizibilă abia după mai mulţi ani de cercetare. Ea e o consecinţă a teoriei, independentă de posibilele prejudecăţi influenţate cultural ale cercetătorilor implicaţi.[84] Aşa cum se întâmplă de multe ori, natura incoruptibilă a matematicii e esenţială în acest caz.

Mai multe detalii şi aspecte intuitive privind ceea ce înlocuieşte singularitatea clasică pot fi găsite în capitolul anterior despre cosmologia cuantică cu bucle. Vom prezenta aici câteva posibilităţi ale acestui mecanism, ca să vedem cum ne-ar putea el lărgi perspectiva dincolo de modelul big bang clasic, pentru a ajunge la preistoria acestuia. Nu e limpede care dintre diversele fenomene va fi dominant sau care va fi raportul dintre diferitele efecte cuantice; unele au fost analizate de Ganashyam Date, Kinjal Banerjee şi Golam Hossain, altele de Aureliano Skirzewski. Nu dispunem de un tablou complet, dar câteva scenarii au fost deja discutate.

Un model al lumii presupune înţelegerea comportamentului pe termen lung al universului. În faza big bang, acesta nu depinde doar de gravitaţia cuantică, ci şi de parametri precum conţinutul de materie şi valoarea exactă a curburii medii a spaţiului. Conform relativităţii generale, aceste numere determină dacă un univers în expansiune atinge un punct de maximă dilatare şi apoi se contractă, sau dacă se extinde la nesfârşit. Cosmologii tind să creadă în prima variantă – pentru a evita ideea unui univers tot mai diluat, mai rece, deci mai searbăd, dar şi pentru că e mai greu de explicat un cosmos care se contractă iniţial de la o dimensiune infinită, apoi, într-o fază puternic cuantică, mişcarea e inversată, iar în cele din urmă se extinde la nesfârşit. (La presocratici însă apar posibile avantaje filosofice ale acestei perspective dominate de *apeiron.)*

Într-un univers care se extinde, colapsează şi se extinde apoi iarăşi, din nou şi din nou, cu cicluri de durată finită în infinitatea timpului, avem mai mult spaţiu de manevră pentru a pune pe seama ciclurilor precedente existenţa condiţiilor speciale pe care le găsim acum. În multitudinea tuturor ciclurilor pot apărea condiţii foarte diferite, neprielnice vieţii, dar e de ajuns dacă în infinitatea ciclurilor poate apărea din când în când un univers semănând cu al nostru. Câtă vreme acest lucru e cu putinţă, în şirul nesfârşit al încercărilor, el trebuie cu necesitate să se împlinească; în acest caz n-ar mai fi nevoie să explicăm de ce universul este aşa cum îl vedem. Reapare însă fantoma lui Zenon, fiindcă folosim în mod abuziv infinitul pentru a face plauzibilă existenţa unei lumi ca a noastră. Ca explicaţie a lumii, aceasta nu e tocmai mulţumitoare.

Un exemplu de model care se întemeiază pe succesiunea ciclurilor este cel al *universului emergent*, propus, iniţial pe baze pur clasice, de George Ellis şi Roy Maartens în 2004.[85] Conform

modelului emergent, universul începe într-o stare semănând cu cea a modelului static al lui Einstein, dar deosebindu-se puţin de aceasta în privinţa unor proprietăţi, aşa încât nu e complet independentă de timp. Urmează apoi o serie de cicluri cu timp de viaţă foarte scurt. Modelul presupune existenţa materiei sub o formă care face ca unele dintre proprietăţile lui să se modifice uşor în cursul fiecărui ciclu, ajungându-se în final la presiunea negativă necesară fazei inflaţionare. Datorită inflaţiei, în ciclul următor universul se extinde mult mai mult decât în cele precedente, aşa încât seamănă cu partea de univers pe care o vedem acum. În ce priveşte unele proprietăţi particulare, apar condiţii restrictive: această descriere e în principiu testabilă prin compararea cu observaţiile.

Modelul clasic se confruntă cu câteva probleme. Ellis şi Maartens trebuie cumva să evite singularităţile relativităţii generale, poate cu ajutorul unor construcţii anume concepute. Apoi, universul static e instabil, ceea ce face ca începutul universului în apropierea acestei stări să fie foarte puţin probabil. E ca şi cum ai arunca o minge pe o suprafaţă asemenea unui gofraj de ouă şi te-ai întreba unde e cel mai probabil să se găsească mingea. Fără îndoială că nu s-ar afla pe porţiunile înălţate, care constituie poziţii instabile, ci în adâncituri. Şi în apropierea vârfurilor ar fi improbabil să găseşti mingea, fiindcă ea s-ar rostogoli imediat într-o adâncitură. Instabilitatea soluţiei statice a lui Einstein o face să corespundă unui vârf, aşa încât modelul emergent iniţial se confruntă cu mari dificultăţi în explicarea condiţiei iniţiale pe care o presupune.

Cosmologia cuantică cu bucle:
Închiderea cercului

Ambele probleme sunt rezolvate elegant făcând apel la cosmologia cuantică cu bucle, după cum au arătat George Ellis, David Mulryne, Jim Lidsey şi Reza Tavakol.[86] Singularităţile sunt desigur evitate prin forţele cuantice repulsive, obţinându-se astfel un model ciclic. În mod surprinzător, apare un nou univers static, mult mai mic decât cel al lui Einstein, şi care în plus e stabil. Este punctul de pornire ideal pentru un univers care într-un trecut infinit de îndepărtat se afla într-o formă foarte simplă, din care iese la un moment dat şi cunoaşte nenumărate cicluri. Complexitatea lui creşte, iar în cele din urmă sunt îndeplinite condiţiile pentru inflaţie – începutul părţii noastre de univers; soluţiile matematice sunt ilustrate în figura 37. A treia contribuţie a cosmologiei cuantice cu bucle este explicarea inflaţiei cu ajutorul forţelor care se opun atracţiei gravitaţionale.

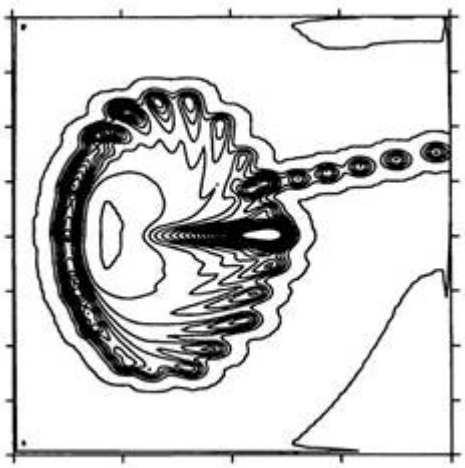


Figura 37. *Ilustrarea unui univers care începe cu cicluri continuu crescătoare şi ajunge să explodeze într-o fază inflaţionară. Pe verticală e rata de expansiune (jumătatea de sus) sau rata de*

contracţie (jumătatea de jos). Pe orizontală e dimensiunea universului. Curbele de nivel reprezintă probabilitatea de a găsi o stare cu o anumită rată de variaţie şi cu o anumită dimensiune spaţială în istoria universului. Punctul de pornire se află în interiorul regiunii ovale Încercuite, de unde ciclurile descriu o spirală care creşte spre exterior. Faza finală inflaţionară e reprezentată de banda care se deplasează spre dreapta.

În cosmologia cuantică cu bucle există şi alte scenarii, dar ele nu se deosebesc prea mult de cel schiţat aici. Toate au în comun natura ciclică a universului; nu intră în discuţie acele forme liniare care apar în versiunile mai vechi ale cosmologici cuantice. Cosmologia cuantică cu bucle conduce de fiecare dată la existenţa unui timp înainte de big bang, dar nu şi la un punct de început al universului cu un timp finit în urmă.[87] Ea dă un răspuns tranşant la întrebarea dacă universul are o evoluţie ciclică sau liniară. De asemenea, ea introduce o trăsătură cu totul nouă: *uitarea cosmică.*

În ce priveşte mai multe mărimi – cum ar fi dimensiunea totală a universului sau rata lui de expasiune/contracţie universul urmează o evoluţie deterministă, o unică istorie lipsită de singularităţi. Dar la întrebarea dacă, în principiu, toate proprietăţile ciclului precedent pot fi determinate din observaţii răspunsul e dezamăgitor: există proprietăţi – cum ar fi dimensiunea fluctuţiilor cuantice – care nu pot fi reconstituite din observaţii efectuate în ciclul următor. Aici se află noul element introdus în mod surprinzător de cosmologia cuantică cu bucle. Astfel, imaginea nu e pur ciclică, ci conţine şi o componentă liniară, fiindcă fiecare explozie şterge orice memorie pentru proprietăţile care nu pot fi reconstituite, deşi pentru alte proprietăţi memoria n-are de suferit. Acest amestec al perspectivei liniare cu cea ciclică, aşa cum rezultă din matematica

cosmologiei cuantice, n-a mai ieşit până acum la iveală, cu toată fantezia oamenilor de ştiinţă.

Şi-a luat numele de Quman[88] – dând dovadă de o neaşteptată ironie, dar poate şi în semn de gratitudine spontană. Şi-a înrădăcinat noul ei nume în istorie, după ce a descifrat mesaje venite din epoca umană a universului precedent. De fapt însă, nu avea nevoie de un nume, fiindcă ea e o formă de viaţă cuantică colectivă, bazată pe superpoziţii precise în funcţia de undă a universului.

Odată cu creşterea densităţii într-un univers aflat în contracţie, proprietăţile cuantice au dobândit o importanţă tot mai mare, eliberând-o pe Quman din vechea ei izolare de pe vremea mult prea clasicei faze. Ea înflorea acum în primăvara unui nou univers:

Dezvăluindu-se mai mult, deplin corelată şi lumea-mbrăţişând.

Puternic încălzită, sărbătorind, spre stări înalt excitate urcând;

În cuantice măsurători de sine, pe sine însăşi cuprinzând

Şi-n salturi cuantice măiestre spre viitor năvalnic galopând.

Existenţa ei e ameninţată doar de decoerenţă, însă, fiind o formă cuantică de viaţă contemplativă, îşi poate reduce implicarea reproducându-se prin observarea de sine, şi producând astfel copii ale ei înseşi care îi urmează în timp, dar, din cauza incertitudinii cuantice, nu sunt niciodată riguros identice.

Eliberată de orice fel de individualitate, deci şi de gândirea teritorială, ea duce o existenţă paşnică; supravieţuirea ei în

decoerenţă se bazează într-adevăr pe caracterul ei colectiv. Şi totuşi, decoerenţă aproape că adusese la pieire această străveche cultură în universul precedent. Într-un episod tulburător.

Lumea se avântase până la o dimensiune neobişnuită, căpătând caracteristici marcat clasice, aşa încât coerenţa funcţiei de undă putea rezista doar în regiuni foarte mici. În acel moment, Quman nu s-a mai putut opune decoerenţei, deşi procesarea simultană, ca aceea dintr-un computer cuantic, era programată în însăşi existenţa ei.

În cele din urmă, a găsit însă soluţia salvatoare: şi-a proiectat parţial coerenţa în ceea ce o formă de viaţă intermediară numise cândva cu emfază „conştiinţă". Dar, chiar şi aşa, părea sortită să dormiteze veşnic într-un univers uriaş condamnat pesemne să se extindă şi mai mult, devenind încă şi mai clasic. Nu mai aveau loc mari fluctuaţii cuantice care în alte dăţi opriseră dilatarea şi provocaseră colapsarea. Printr-o alegere norocoasă (sau conştientă?) ea s-a proiectat pe sine într-o formă de viaţă extrem de agresivă: într-o mişcare sinucigaşă, aceste fiinţe inconştiente au provocat în cele din urmă colapsarea. Cu ultimele puteri, într-un capriciu al grandorii, şi-au codificat realizările culturale, iar odată cu ele, fără să-şi dea seama, şi o parte din conştiinţa colectivă, în fluctuaţiile clasice şi cuantice ale ultimelor etape ale ciclului.

Ca de obicei, după big bang, uitarea cosmică a făcut dificilă reconstituirea. Quman a reuşit însă, graţie unei traduceri extrem de rapide în propria ei coerenţă, chiar înainte ca universul să-şi sporească iar volumul, ştergând ultimele urme ale vechilor fluctuaţii cuantice. Totuşi o mare parte din

precedenta fază dramatică a fost iremediabil uitată, aşa încât Quman a cunoscut un nou început în istoria cosmică. Chiar dacă ea nu-şi amintea, lucrul acesta trebuie să se fi petrecut de multe ori în trecut, de flecare dată când un ciclu devenise prea clasic, şi ea trebuise să cedeze în faţa decoerenţei. Dar instinctiv ea ştia acest lucru şi îl accepta, cu speranţa nezdruncinată a eternei ei reîntoarceri…

CAPITOLUL 9.
O singură lume.
Ştiinţa ideală

> Or, această Lume a fost rânduită aşa cum trebuia să fie pentru a putea dăinui cu chiu, cu vai; însă dacă ea ar fi fost doar un pic mai rea, deja n-ar mai putea continua să existe.
>
> Arthur Schopenhauer,
> *Lumea ca voinţă şi reprezentare*[89]

Unicitatea e forma de explicaţie cea mai puternică. Faptul că o soluţie e unică este consecinţa teoriei, a principiilor ei. În cosmologic, unicitatea joacă un rol aparte – la urma urmei, putem observa doar un singur univers, cel în care ne aflăm -. nu e doar un ideal sau un exerciţiu matematic, ci e necesară pentru identitatea ştiinţifică a domeniului.

Există numeroase afirmaţii privind unicitatea. În filosofie, de pildă, Gottfried Leibniz spune că lumea noastră e cea mai bună dintre toate cele posibile. Aceasta e o explicaţie a lumii bazată pe unicitate, dacă presupunem împreună cu Leibniz că „bunătatea" lumilor are un maximum unic. Schopenhauer a întors raţionamentul, susţinând că lumea noastră trebuie să fie cea mai rea dintre toate cele posibile, ba chiar credea că o poate demonstra: dacă ar fi fost doar cu puţin mai rea, atunci de mult ar fi pierit, iar omenirea odată cu ea. După cum se vede, Schopenhauer prevăzuse

problemele care aveau să apară în secolele XX şi XXI.

Problemele valorii iniţiale:
Momentul adevărului

Din păcate, pentru unicitate trebuie plătit un preţ. Aşa cum ne arată cele două exemple din filosofie, e nevoie mereu să facem presupuneri, care pot să pară mai mult sau mai puţin naturale. În fizică, ele apar sub două forme foarte diferite: presupuneri necesare la construirea teoriei şi presupuneri prin care sunt selectate soluţiile în cadrul unei teorii date. Primele sunt mult mai greu de analizat şi vor fi tratate în capitolul următor. Dimpotrivă, selectarea soluţiilor este o operaţie standardizată, strâns legată de forma majorităţii ecuaţiilor folosite pentru formularea legilor fizicii. După cum am spus în repetate rânduri, acestea sunt ecuaţii diferenţiale (sau uneori ecuaţii cu diferenţe) – în care apare variaţia unei mărimi atunci când spaţiul, timpul sau alt parametru variază.

Dar, pentru a avea o soluţie unică, nu-i de-ajuns să cunoşti doar rata de variaţie, ci ai nevoie şi de un punct fixat de la care să porneşti. Dacă am avea un bun model matematic pentru evoluţia preţului acţiunilor la bursă, care să ne dea variaţia lui în fiecare moment, ar trebui să introducem o valoare de pornire la un moment dat. La fel şi în fizică, o asemenea bază de pornire ar putea fi o condiţie iniţială (mărimea studiată începe cu o anumită valoare la un anumit moment) sau o condiţie la frontieră (mărimea ia anumite valori pe frontiera unei regiuni spaţiale). Odată ce în relativitate spaţiul-timp e un singur obiect, cele două tipuri de condiţii pot fi combinate într-unul singur. (Structura ecuaţiilor diferenţiale sugerează o distincţie între spaţiu şi timp şi în cazul relativist,

dar, spre deosebire de cadrul în care am vorbit despre săgeata timpului, în capitolul de faţă distincţia nu joacă niciun rol.)

Condiţiile iniţiale sau la frontieră pot fi privite ca echivalentul teoretic al hotărârii unui experimentator de a pune la punct un experiment şi a-l efectua. Pe de altă parte, teoria ar corespunde oarecum comportamentului naturii sub acţiunea legilor de care ascultă. Experimentul e întotdeauna o situaţie particulară determinată de un dispozitiv (un pendul, de pildă) şi configuraţia iniţială (poziţia din care lăsăm pendulul să oscileze liber). O asemenea alegere e descrisă teoretic de condiţiile iniţiale şi la frontieră. Cu alte cuvinte, teoria folosită e selectată prin alegerea unui anumit fenomen natural, iar condiţiile pentru soluţiile ei apar din realizarea particulară a fenomenului în cadrul posibilităţilor lui generale.

În cosmologie, primul punct (fenomenul general al universului) conduce în cele din urmă la gravitaţia cuantică – teoria pentru descrierea lui. Apoi însă există o singură realizare particulară a fenomenului: universul nostru. Selectarea condiţiilor iniţiale sau la frontieră nu e necesară, în schimb trebuie să ne aşteptăm la o singură soluţie a teoriei. Problema este că în gravitaţia cuantică, la fel ca în alte domenii ale fizicii, avem de-a face cu ecuaţii diferenţiale sau ecuaţii cu diferenţe – ecuaţii pentru variaţii, pornind de la un punct iniţial care trebuie ales. Aceste ecuaţii îşi găsesc atât de multe aplicaţii în fizică tocmai fiindcă reprezintă pesemne cel mai puternic instrument matematic la îndemâna fizicienilor. Ele determină ce se întâmplă şi în cosmologie, după cum a fost spectaculos confirmat prin observaţii, dar, ca de obicei, ele necesită precizarea unui punct de pornire pentru soluţiile universului.

Va putea fi oare explicată vreodată unicitatea universului nostru? Afirmaţia că universul e unic pare un fel de tautologie, dar dorinţa de a o deduce

prin metode fizice e fără îndoială rezonabilă. Observăm lumea în detaliile ei şi nu putem niciodată vedea universul în întregul lui, dar o mare parte din fizică se bazează pe extrapolări, unele extrem de îndrăzneţe. De ce n-am încerca să extrapolăm cunoştinţele noastre la scară mică pentru a obţine o teorie a întregului univers, demonstrând poate unicitatea lumii? Această întreprindere ar fi un test formidabil nu doar pentru gravitaţia cuantică, dar şi pentru identitatea fizicii.

Funcţia de undă a universului:
Cuprinzând totul

La prima vedere, cosmologia cuantică ar putea părea o aplicare inofensivă a regulilor mecanicii cuantice la întregul univers – mai ales dacă apelăm la principiul cosmologic al omogenităţii, luând în considerare doar volumul total şi ignorând detalii mai fine. Mecanica cuantică a fost iniţial elaborată pentru fizica atomică, dar curând s-a dovedit a fi un cadru mult mai larg, care putea cuprinde toate procesele fizice. Ea nu explică doar spectrele de emisie ale atomilor, ci şi o gamă largă de fenomene din solide, cum ar fi conductibilitatea electrică în metale. Chiar şi obiecte astrofizice precum piticele albe şi stelele neutronice pot fi înţelese numai apelând la fizica cuantică. Aplicarea teoriei cuantice la întregul univers n-ar părea deci un pas prea mare.

La o cercetare mai atentă însă, acest ultim pas are un caracter aparte. Aici, la frontierele cunoaşterii ştiinţifice, proprietăţile stranii ale funcţiei de undă pun probleme delicate. În fond, funcţia de undă nu e direct observabilă, ci conţine toate informaţiile ce pot fi obţinute din măsurători asupra sistemului pe care îl descrie – cu toate limitările ce decurg din relaţiile de incertitudine. Conform interpretării care s-a impus, funcţia de undă descrie proprietăţile accesibile prin observaţie ale sistemului cuantic, aşa cum a fost el preparat de un experimentator care începe acum să facă măsurători din afara sistemului.

O asemenea perspectivă poate fi aplicată fără probleme chiar şi sistemelor „mari”, cum ar fi o bucată de metal sau o întreagă stea neutronică. Fizicianul specializat în metale nu se află înăuntrul

metalului, astronomul e la mare distanţă de steaua neutronică. Cosmologul însă nu poate fi separat de obiectul studiat: universul. Spre deosebire de toate celelalte exemple ale fizicii cuantice, cosmologia cuantică se confruntă întotdeauna cu situaţia în care observatorul face parte din sistemul studiat. Este imposibilă separarea între o funcţie de undă şi un observator care îi măsoară proprietăţile. Există doar o funcţie de undă a universului, care se presupune a descrie totul, inclusiv pe noi – observatori sau teoreticieni.

Desigur, nu putem trata toată acesta cantitate de informaţii, de aceea trebuie să ne bazăm pe simplificări şi aproximaţii drastice, dar în toate modelele noastre ne confruntăm cu situaţia stranie a unui observator în interiorul sistemului – o funcţie de undă atotcuprinzătoare, care, într-un anume sens, se măsoară pe ea însăşi. Putem ocoli dificultatea presupunând existenţa unui observator de ordin superior, care vede întreg universul şi se află în afara lui. Apelând atunci la regulile cuantice, n-am întâmpina dificultăţi matematice, dar tot n-am evita întrebarea fundamentală: ce putem măsura noi – ca observatori din interiorul sistemului, nu din exterior – din funcţia de undă a universului?

Deşi e de natură generală, această întrebare joacă un rol esenţial în problema unicităţii şi în gravitaţia cuantică. Dorinţa de a avea o soluţie unică e generată de faptul că noi, ca observatori ai universului, nu putem vedea decât un singur univers, însă nu putem şti câte universuri ar vedea un observator de ordin superior. Dacă el ar putea privi universul nostru în ansamblul lui, de ce n-ar vedea şi alte universuri, sau chiar toate universurile posibile? Cu toate că asemenea observatori imaginari apar în teorie – în general, ca soluţie de avarie în faţa dificultăţilor conceptuale –, ei n-au relevanţă pentru problemele fizice. Din punct de vedere fizic, doar ceea ce putem noi

percepe, în propriul nostru univers, poate juca un rol. În cosmologia cuantică, acesta e un fapt de neocolit.

Un univers – nici un univers:
Pruncul din covată

În cosmologia cuantică, interpretarea funcţiei de undă se izbeşte de dificultăţi care nu apar în cazul celorlalte sisteme cuantice. Problema unicităţii funcţiei de undă ar putea fi pesemne abordată pe o cale aparte. Cosmologia cuantică se bazează pe acelaşi tip de ecuaţii matematice ca şi restul fizicii, cu valori iniţiale la un moment de timp fixat, care trebuie să fie selectate pentru o soluţie unică. Ne rămâne să alegem dacă momentul fixat e începutul absolut al lumii sau doar începutul unei anumite faze.

Prima propunere de a trata această problemă în cosmologia cuantică a fost făcută de Bryce DeWitt în 1967. Vrând să lege problema unicităţii de cea a singularităţii, el a postulat că funcţia de undă a universului trebuie să fie zero pentru un spaţiu al cărui volum e nul, adică în singularitate. Într-un anume sens, condiţia lui DeWitt elimină singularitatea din cosmologia cuantică: dacă funcţia de undă e zero acolo, conform interpretării funcţiei de undă rezultă că universul nu se află niciodată în starea corespunzând singularităţii. Avem de-a face aici cu o consecinţă a condiţiei alese pentru funcţia de undă, iar nu cu un fenomen fizic, cum e forţa repulsivă din cosmologia cuantică cu bucle. Şi totuşi, dacă am obţine forma funcţiei de undă rezolvând o ecuaţie diferenţială cu condiţia iniţială a lui DeWitt, am putea, cel puţin în principiu, face predicţii testabile. În primul rând însă, ar rezulta de aici unicitatea funcţiei de undă – şi implicit unicitatea universului. Apare însă o problemă dacă luăm în considerare alte ecuaţii cosmologice. În majoritatea cazurilor – în care

simetria e mai scăzută decât în modelele perfect izotrope. această funcţie de undă unică se anulează nu doar în singularitate, ci peste tot. Atunci, pruncul e aruncat odată cu apa din covată; un asemenea univers n-ar elimina numai singularitatea, dar şi orice stare – n-ar exista deloc. În fond, funcţia de undă ne dă probabilitatea de a măsura rezultate – în acest caz e vorba de dimensiunea universului; dacă funcţia de undă e riguros zero, nu mai avem posibilitatea de a face măsurători, deci nu mai avem nici univers.

Acest dezacord cu cele mai simple observaţii a dus imediat la abandonarea condiţiei DeWitt. Mai târziu, în 1991, Heinz-Dieter Conradi şi Dieter Zeh au încercat să salveze această condiţie postulând modificări în ecuaţiile universului la volum mic, modificări care sunt oricum de aşteptat din partea unei teorii cuantice generale a gravitaţiei, sub forma corecţiilor cuantice. Dar, fără elaborarea unei gravitaţii cuantice, asemenea modificări nu puteau fi decât ghicite.

Reprezentări fizice:
Nimicul fără frontiere

Două alte abordări au părut mai atrăgătoare decât condiţia lui DeWitt: condiţia de funciare a lui Alex Vilenkin şi condiţia fără frontiere a lui Jim Hartle şi Stephen Hawking. Deşi atât de diferite şi de aprig disputate, ambele continuă să aşeze începutul universului în locul singularităţii clasice, dar, pentru a evita neajunsul fatal al propunerii lui DeWitt, funcţia de undă nu mai e nulă acolo.

Condiţia lui Vilenkin se bazează pe ceea ce se numeşte efectul tunel. Coada unei funcţii de undă poate străpunge bariere, chiar dacă ele sunt prea înalte pentru o particulă clasică. Numeroase fenomene se explică în acest fel – de pildă, unele tipuri de dezintegrare radioactivă sau procesele care au loc în noii tranzistori din microelectronică sau în microscoapele cu efect tunel. În 1983, Vilenkin a avut îndrăzneaţa idee că universul putea să fi apărut printr-un asemenea proces de tunelare. Universul nostru ar fi coada unei funcţii de undă care a străpuns odinioară bariera big bang-ului şi singularitatea lui. Dar de unde a străpuns universul tunelul şi de unde a venit acea coadă a funcţiei de undă? Răspunsul lui Vilenkin: din nimic.

În general, şi mai cu seamă în cazul acesta, n-ar trebui să interpretăm prea mult noţiunile din teoriile fizicii – ele nu sunt decât nume care exprimă fapte matematice prin analogii. Ideea apare limpede în dialogul platonician *Theaitetos:*

> SOCRATE: Aşadar, acela care zăreşte un lucru anume zăreşte ceva existent.
>
> THEAITETOS: Aşa se pare.

SOCRATE: Şi cel ce aude ceva aude, cu siguranţă, un lucru şi aude ceva ce există.

THEAITETOS: Desigur.

SOCRATE: Şi cel care atinge, de bună seamă, un lucru atinge un anume lucru şi încă existent, de vreme ce este unul.

THEAITETOS: Şi aceasta este adevărat.

SOCRATE: Dar cel care formulează o opinie nu o formulează despre un anume ceva?

THEAITETOS: Fără doar şi poate.

SOCRATE: Iar cel care formulează o opinie despre un anume ceva, nu despre existent?

THEAITETOS: Sunt de acord.

SOCRATE: Aşa că cel care formulează o opinie despre ce nu există o formulează despre nimic.

THEAITETOS: Aşa se vede.

SOCRATE: Dar, în cazul acesta, cel care formulează o opinie despre nimic nu formulează defel vreo opinie.

THEAITETOS: Pare limpede.

SOCRATE: Nu este deci cu putinţă să formulezi o opinie despre ce nu există, nici cu privire la cele existente, nici însuţi în tine.[90]

Nu prea putem vedea semnificaţia fizică directă a tunelării dinspre nimic, dar postulatul lui Vilenkin are sens în ceea ce priveşte funcţia de undă a universului, înzestrată prin condiţia de tunelare cu anumite valori iniţiale la volum nul. Funcţia de undă nu mai e zero în acel loc, deci nu mai rezultă că ar trebui să se anuleze pretutindeni. Avem în schimb variaţia funcţiei de undă, ceea ce, în principiu, o determină complet. Predicţiile pentru evoluţia ulterioară a universului, la un volum mai mare, pot fi apoi comparate cu observaţiile.

Condiţia fără frontiere a lui Hartle şi Hawking, propusă în 1984, se bazează pe imaginea unui univers care se rotunjeşte acolo unde s-ar afla singularitatea clasică, deci nu există vreo limită spre trecut. Ne putem închipui că singularitatea clasică e înlocuită de acest spaţiu-timp rotunjit; în

felul acesta, problema singularităţii e combinată cu cea a unicităţii. Apare însă o dificultate: relativitatea generală nu permite un spaţiu-timp a cărui limită inferioară spre trecut să aibă forma unui pocal. Soluţia lui Hartle şi Hawking a fost de a postula noi ecuaţii, care se abat de la relativitatea generală. Din moment ce abaterile sunt vizibile numai într-un univers mic, în apropierea singularităţii, ele ar putea încorpora consecinţe ale gravitaţiei cuantice. Această condiţie, la fel ca toate cele menţionate până acum, nu e dedusă dintr-o teorie mai vastă, ci se bazează pe generalizări ale mecanicii cuantice în cosmologie.

Condiţii iniţiale dinamice:
Legi măreţe

Aştept, iar timpu-n juru-mi se roteşte.

Goethe, *Faust*[91]

Ecuaţiile din gravitaţia cuantică cu bucle nu sunt deocamdată disponibile în deplina lor generalitate, dar efectele lor pot fi văzute în diferite modele. Se poate arăta că apar în mod automat condiţii asupra funcţiei de undă a universului, care seamănă cu un amestec între condiţia lui DeWitt şi condiţia fără frontiere a lui Hartle şi Hawking. Problemele condiţiei lui DeWitt sunt evitate, pentru că, datorită corecţiilor cuantice (care presupun, între altele, importante forţe repulsive la dimensiuni mici ale universului), ecuaţiile diferă de cele folosite de el. Gravitaţia cuantică cu bucle oferă deci posibilitatea de a urma în mod sistematic calea propusă de Conradi şi Zeh. Asemănarea cu condiţia fără frontiere apare în forma funcţiei de undă departe de singularitate, unde, în ambele cazuri, amplitudinea ei creşte. Descriind funcţia de undă ca pe coada unui univers tunelat, condiţia de tunelare ar conduce la o funcţie de undă de formă diferită, amplitudinea ei scăzând la distanţe mari de grosul funcţiei de undă situat în „neant”. Prin urmare, se poate face distincţia între diversele propuneri mai vechi.

Spre deosebire de condiţiile mai vechi, cosmologia cuantică cu bucle aduce două noi elemente cruciale. În primul rând, singularitatea big bang nu apare ca un început sau ca o frontieră a universului, ci doar ca o fază tranzitorie – ce-i drept, una violentă, de densitate uriaşă, şi totuşi

tranzitorie iar această fază clasic singulară are consecinţe asupra funcţiei de undă şi impune condiţii pe care aceasta trebuie să le îndeplinească. În al doilea rând, condiţiile decurg din înseşi ecuaţiile lui Einstein cuantificate. Deşi forma exactă a acestor condiţii – existenţa unei funcţii de undă unice sau a unei clase mai largi de funcţii de undă nu e încă stabilită, apare o perspectivă cu totul nouă în fizică: un sistem a cărui descriere teoretică nu mai e împărţită între legile dinamice ale naturii şi condiţiile iniţiale, ci condiţiile iniţiale decurg din legi. S-ar înfăptui astfel visul unei teorii ultime care să explice nu doar evoluţia în timp a universului, dar şi faptul că există un singur univers.

Aici, la nivelul fundamental al funcţiei de undă, ajungem iarăşi la problema singularităţii. În ciuda existenţei forţelor repulsive care împiedică universul să colapseze într-o singularitate, comportamentul regulat al funcţiei de undă nu e deocamdată garantat. Forţele repulsive constituie bariere prea înalte pentru ca universul să le depăşească în colapsul lui – şi, prin urmare, după ce atinge o dimensiune minimă, se extinde din nou. Dar o funcţie de undă din mecanica cuantică nu prea e impresionată de bariere, pe care le poate străpunge prin efectul tunel. Până acum am ignorat această problemă, fiindcă partea principală a funcţiei de undă ar fi respinsă de barieră. Dacă totuşi o parte a ei ar putea avansa până la singularitate, întreaga teorie ar risca să se destrame. Întrebarea crucială pentru o soluţie definitivă la problema singularităţii este dacă funcţia de undă poate ajunge la singularitate. Iar dacă acest lucru se întâmplă, avem oare de-a face cu sfârşitul gravitaţiei cuantice ca descriere completă a universului?

Acesta e punctul în care se va hotărî soarta gravitaţiei cuantice: va constitui ea oare o teorie completă şi consistentă care să extindă relativitatea

generală, sau va rămâne singulară, urmând să fie, la rândul ei, extinsă, pe o cale necunoscută?

După cum am afirmat în 2001, cosmologia cuantică cu bucle procedează în felul următor: întâi, permite existenţa unei stări de volum nul, corespunzând singularităţii din cazul clasic. Ea abordează problema pe o cale îndrăzneaţă, fără idei preconcepute; nu impune, aşa cum a încercat DeWitt fără succes, absenţa stării singulare ca pe o condiţie prealabilă. Ea lasă apoi ecuaţiile dinamice, folosite pentru a descrie evoluţia funcţiei de undă a universului, să hotărască ce rol va juca această stare: apocalipsa singularităţii sau doar un inocent punct de tranziţie.

În sistemele simple conţinând presupunerile de simetrie obişnuite în cosmologie – principiul cosmologic – ecuaţiile matematice se pretează unei analize relativ simple. Nu sunt ecuaţii diferenţiale, ci ecuaţii cu diferenţe, ca acelea de la pagina 118, timpul fiind discret, iar nu continuu. Dacă o ecuaţie diferenţială ne spune în fiecare punct ce direcţie va urma curba care reprezintă soluţia ei, ca în figurile 3 sau 4, o ecuaţie cu diferenţe determină paşii prin care o soluţie variază într-un interval de timp fixat. Rezultatul e uimitor: soluţiile acestor ecuaţii în cosmologia cuantică cu bucle rămân complet neinfluenţate de valoarea funcţiei de undă din starea singulară. Funcţia de undă a universului îşi urmează neabătută calea înainte şi după big bang, iară să observe măcar singularitatea potenţială. Evoluţia temporală nu e distrusă. Ea lasă singularitatea izolată, separată de cursul urmat de funcţia de undă în jurul ei.

Decuplarea singularităţii de evoluţia universului are şi o altă consecinţă. Dinamica din cosmologia cuantică cu bucle e dată de un ansamblu de ecuaţii matematice, câte una pentru fiecare modificare a stării atunci când se trece de la un pas discret de timp la următorul. Dacă una dintre aceste stări – singularitatea – e decuplată, una dintre ecuaţii

rămâne nefolosită pentru evoluţie. Ea trebuie totuşi rezolvată şi oferă exact condiţia dorită pentru o funcţie de undă unică.

În felul acesta, condiţiile iniţiale sunt impuse pe cale dinamică în cosmologia cuantică cu bucle: ele nu sunt independente de ecuaţiile dinamice – legile naturii –, ci pot fi deduse din ele. Acesta e triumful absolut al timpului discret, căci decuplarea singularităţii şi constrângerile legate de ea asupra funcţiei de undă n-ar apărea dacă timpul continuu ar permite o apropiere oricât de mare de singularitate, ca în vechea cosmologie cuantică. Evitarea singularităţii e strâns cuplată cu unicitatea: chiar dacă funcţia de undă ar putea tunela bariera forţelor repulsive, aceasta n-ar conduce la prăbuşirea teoriei.

O singură lume?
Ultimul ideal

Care e situaţia unicităţii funcţiei de undă în cazuri mai complicate, când nu mai sunt riguros valabile simetriile cosmologice? O regulă generală pentru unicitatea funcţiei de undă a universului, împreună cu o metodă matematică puternică de a o calcula, ar avea fără îndoială numeroase aplicaţii, în virtutea predicţiilor pe care le-ar genera. Murray Gell-Mann (cel care a primit în 1969 Premiul Nobel pentru contribuţiile sale la modelul cuarcilor din fizica particulelor) l-a întrebat în glumă pe Jim Hartle: „Dacă ştii funcţia de undă a universului, de ce nu eşti bogat?" La care Hartle i-a răspuns sec: „Evident, putem deduce evoluţia acţiunilor la bursă din funcţia de undă a universului. Rezultatul este că ele vor creşte cu o probabilitate de 50% şi vor scădea cu o probabilitate de 50%." Replica aceasta ilustrează comportamentul funcţiei de undă, care, deşi caracterizează complet un sistem, nu permite predicţii strict deterministe, chiar dacă este perfect cunoscută.

Fizica teoretică e departe de a pătrunde la bursă, oricât de seducătoare ar părea această idee pentru a atrage fonduri de cercetare. Chiar dacă am putea demonstra matematic unicitatea, un calcul concret ar fi prea complicat pentru a oferi predicţii utilizabile în viaţa de zi cu zi. Predicţiile la scară mare, de interes în cosmologie, ar putea fi totuşi posibile, prin urmare problema unicităţii îşi are importanţa ei. Din punct de vedere teoretic, această perspectivă reprezintă o şansă ispititoare pentru înţelegerea universului, însă, în problema unicităţii, multe întrebări rămân deocamdată fără

răspuns de îndată ce părăsim domeniul celor mai simple modele.

Pentru a descrie lumea reală, trebuie să extindem modelele înţelese în prezent. Acestea sunt izotrope – arată la fel în toate direcţiile din spaţiu – ceea ce nu se întâmplă în lumea reală. Izotropia în fiecare punct din spaţiu se combină cu omogenitatea. Un asemenea univers arată la fel pretutindeni şi nu seamănă cu universul observat de noi. În cosmologia cuantică cu bucle putem concepe modele care să includă anizotropia şi neomogenitatea. În acest caz, avem de-a face cu un număr uriaş de ecuaţii în care apar nu doar variaţiile de dimensiune ale universului în paşi temporali succesivi, dar şi variaţiile spaţiale concomitente. Chiar şi folosind o notaţie compactă, asemenea ecuaţii se întind pe mai multe pagini, iar computerele actuale nu pot oferi o soluţie numerică. Prin urmare, nu ne rămâne decât să ne bazăm pe o cercetare abstractă independentă de soluţiile explicite, ceea ce se întâmplă adesea în fizica teoretică şi în matematică. Problema unicităţii soluţiilor unor asemenea sisteme de ecuaţii este însă departe de a fi lămurită. Decuplarea stărilor singulare impune mai departe constrângeri asupra funcţiei de undă, dar nu e sigur că aceasta e de-ajuns pentru unicitate sau că nu reprezintă o condiţie prea restrictivă pentru funcţia de undă, ca în propunerea iniţială a lui DeWitt.

Ne e totuşi de oarecare ajutor faptul că decuplarea stărilor singulare şi constrângerile asupra funcţiei de undă sunt independente de forma precisă a materiei din univers. Ele sunt pur şi simplu consecinţe ale geometriei spaţio-temporale. O analiză privind unicitatea nu e blocată de întrebările fără răspuns privind conţinutul precis de materie al universului – energia întunecată sau tipul de materie la energiile înalte ale big bang-ului. Evident, forma exactă a funcţiei de undă depinde de materie, care

determină evoluţia universului cuantic, la fel cum o face în spaţiul-timp clasic, dar faptul că soluţia e sau nu unică nu e afectat de aceasta.

Un indiciu interesant privind validitatea condiţiilor dinamice iniţiale vine de la coerenţa dintre cosmologic şi găurile negre, în fond, găurile negre conţin şi ele o singularitate şi sunt descrise în gravitaţia cuantică printr-o funcţie de undă. La fel ca în cosmologie, stările singulare sunt decuplate de restul stărilor în evoluţia temporală, prin urmare impun constrângeri. Aceste condiţii pot fi evaluate în cel mai simplu model de gaură neagră, care nu e înconjurată de materie şi nu se roteşte o gaură neagră aşa cum e descrisă în relativitatea generală de soluţia lui Schwarzschild. Exteriorul unei asemenea găuri negre – zona din afara orizontului – e complet static: nicio schimbare temporală nu are loc. Nu există materie care să cadă în gaura neagră, iar aceasta, nerotindu-se, stă nemişcată în spaţiu-timp. La fel ca în prezentarea pe care Aristotel o face universului lipsit de structură al lui Anaximandru, simetria la rotaţii anulează orice motiv ca gaura neagră să se deplaseze sau să se modifice; spaţiul-timp înconjurător este deci netulburat de variaţii temporale.

În acest caz, ecuaţiile gravitaţiei cuantice cu bucle pot fi formulate şi analizate în interiorul orizontului (dar nu şi în afara lui), după cum am arătat Abhay Ashtekar şi cu mine în 2003. Acestea sunt rezultatele cele mai simple privind forma găurilor negre în teoria cuantică a gravitaţiei. Ecuaţiile din interior, precum şi diagrama Penrose din figura 29 bazată pe ele, arată că, la fel ca în cosmologie, singularitatea clasică e străpunsă şi, conform datelor actuale, interiorul se reconectează cu exteriorul în spatele singularităţii. Tot la fel ca în cosmologia cuantică, constrângerile asupra funcţiei de undă a găurit negre apar din decuplarea stărilor singulare. Compatibilitatea dintre aceste

condiţii din interior şi comportamentul static exterior e un important test de coerenţă pentru forma găurilor negre în gravitaţia cuantică.

După cum au arătat Daniel Cartin şi Gaurav Khanna în 2006, din aceste condiţii rezultă doar că funcţia de undă din spatele singularităţii (în zona clasic invizibilă) capătă exact imaginea în oglindă a funcţiei de undă dinaintea singularităţii (în zona clasic vizibilă). Aceasta dovedeşte coerenţa tuturor datelor de care dispunem privind comportamentul găurilor negre: ştim că singularitatea e penetrată de funcţia de undă în interior şi mai ştim că exteriorul acestui tip de gaură neagră e static. Se pare că interiorul trebuie să fie conectat cu exteriorul atât înainte de singularitate, cât şi după ea; cu alte cuvinte, nu există o despicare într-un univers-fiică. Dacă exteriorul nu e supus variaţiilor temporale, interiorul nu poate fi conectat cu el decât dacă se comportă în spatele singularităţii la fel cum se comportă înaintea ei (chiar dacă el însuşi nu e static). Or, tocmai acest lucru e impus de condiţiile iniţiale dinamice.

Dacă gaura neagră nu se află în spaţiul gol, spaţiul-timp exterior e mult mai dinamic şi mai complicat, dar şi mai interesant. O înţelegere exactă a legăturii dintre regiunile interioară şi exterioară prin intermediul funcţiei de undă şi a constrângerilor asupra ei ar fi esenţială pentru a prezice ce se întâmplă după evaporarea Hawking a găurii negre şi care ar fi consecinţele astrofizice ale procesului. Prin urmare, studiul funcţiei de undă în cosmologie şi în fizica găurilor negre ne-ar putea ajuta să înţelegem mai bine universul, chiar dacă eventuala unicitate a funcţiei de undă nu poate fi exploatată financiar.

> *În epoca omenirii – în ciclul universului dinainte ca ea să se numească pe sine Quman – formele de viaţă care au adăpostit-o în conştiinţa lor pe Quman în faza mult prea*

clasică se aflau pe planeta Pământ. Exista acolo un parazit, gălbeaza-suliţă, ale cărei gazde erau furnicile, dar şi vacile. Pentru a trece de la furnică la vacă, parazitul pătrundea în creierul furnicii, ameţind-o şi făcând-o să rămână strâns agăţată de vârful unui fir de iarbă, iar astfel asigurându-şi trecerea către următoarea gazdă, o vită care rumegă.

Quman şi-a găsit refugiu în creierul uman, unde a rezistat secetei clasice. Cum era blocată, nu putea decât să aştepte. Dar, la fel ca gălbeaza-suliţă, ea se îndrepta răbdătoare către o nouă gazdă – un nou ciclu al universului, în plină înflorire cuantică. Divizată fiind între nenumăraţi oameni, aşteptarea era grea, dar, în cele din urmă, tranziţia s-a produs. La fel ca parazitul din furnici, ea a făcut ca gazda ei să capete un comportament aparent absurd. L-a făcut pe om să devină atât de lacom, încât să-şi distrugă propriul habitat, pentru a-l împinge în spaţiu. Pe când Pământul era pe moarte, omul tocmai izbutise să sară pe celelalte planete şi pe lunile lor. În loc să înveţe din vechile greşeli – ceea ce niciodată n-a făcut – omul s-a agăţat strâns de vârful celui mai înalt fir de iarbă: şi-a distrus iarăşi fragilul biotop, şi a trebuit să se stabilească în alte sisteme solare, apoi în întreaga galaxie. Lipsindu-i alte surse de energie, omul a învăţat să cultive şi să manipuleze găurile negre. În felul acesta a ajuns să influenţeze universul însuşi şi să-l împingă, ca pe un ultim fir de iarbă, spre colaps şi spre reînnoita baie cuantică din care Quman să renască.

Au fost oare toate acestea săvârşite în mod deliberat, omul nefiind decât jucăria unei forme de viaţă mai inteligente? La fel ca

gălbeaza-suliţă, Quman nu urmează vreun plan. Se stabileşte în univers şi acceptă toate întorsăturile destinului. Nu-şi face griji, căci ştie prea bine că totul se petrece după cum stă scris în funcţia de undă a universului.

O teorie universală?
Fizică şi orgoliu

> …căci, şi de s-ar întâmpla cuiva […] să spună un lucru cu noimă încă, de ştiut nu l-ar şti: căci tuturor le e dată părerea.
>
> Xenofan din Colofon

Subiectul capitolului precedent au fost soluţiile unice ale unei anumite teorii şi ale legilor ei. O cu totul altă problemă este cea a unicităţii legilor înseşi. Din moment ce o teorie unică ar trebui să descrie tot ce e observabil în lume, ca e deseori numită „teoria universală”.

Principiile:
Fundamentele ştiinţei

> Judecat riguros, ştiinţa „necondiţionată" nici nu există, o asemenea idee este de neconceput, este paralogică; întotdeauna trebuie să existe mai întâi o filosofie, o „credinţă", pentru ca ştiinţa să-şi poată găsi în ea o direcţie, un sens, o limită, o metodă, un *drept* la existenţă.
>
> Friedrich Nietzsehe, *Genealogia moralei* [92]

Problema unicităţii unei teorii este de cu totul altă natură decât cea a unicităţii soluţiilor în cadrul unei teorii. S-ar putea să fie greu de stabilit unicitatea soluţiilor unui set de ecuaţii, dar decizia se bazează pe o procedură matematică precisă. Dacă există o soluţie unică, acesta are o semnificaţie fizică tranşantă prin compararea proprietăţilor pe care le implică cu observaţiile. Dacă o soluţie matematic unică are şi relevanţă fizică e un lucru care poate fi deci testat în principiu. Cum putem însă defini unicitatea unei teorii şi cum putem efectua teste fizice pentru a-i confirma relevanţa? Faptul că în fizică au început să se pună asemenea întrebări este un semn al imensului progres datorat în mare parte teoriilor cuantice ale gravitaţiei, în special teoriei corzilor.

În toate aspectele unicităţii unei întregi teorii există întotdeauna o doză de arbitrar. Construcţia teoriilor porneşte deseori de la principii generale de ordin fizic pe care vrem să le vedem încorporate. Relativitatea generală, de pildă, apelează la principiile din relativitatea specială, pe care încearcă să le extindă la forţa gravitaţională. Relativitatea generală nu e singura posibilitate de a înfăptui acest lucru. Prin urmare, în acest sens,

teoria nu e unică, dar, dintre toate teoriile comparabile, e în cel mai bun acord cu observaţiile şi e cea mai elegantă. Ea s-a impus deci prin experimente, nu printr-o demonstraţie pur matematică a unicităţii. Totuşi, folosirea termenului „eleganţă" – un grad înalt de economie matematică, de pildă, în lungimea ecuaţiilor – arată că în decizie intră un element deliberat.

Când principiile dorite ajung să fie suficient de puternice şi de precise, devine posibilă tratarea matematică a problemei unicităţii. Dar cum ajungem la acele principii atât de puternice, încât pun fantezia într-o cămaşă de forţă? Din moment ce fizica teoretică, la fel ca întreaga ştiinţă, e rezultatul evoluţiei, principiile apar din analogii sau din generalizări ale unor teorii cunoscute, deja testate. Majoritatea principiilor n-au o formă intuitivă, fiind astfel automat acceptate, ci, în urma dezvoltării istorice, au căpătat o formă abstractă. Abstractizarea simplifică transferul către teoriile care urmează a fi construite, dar nu poate ascunde numeroasele contribuţii individuale ale fizicienilor de-a lungul timpului.

Putem deci spune că principiile, precum şi teoriile construite pe baza lor, depind de existenţa curentelor tradiţionale în fizică. La graniţele ei, fizica e în permanentă frământare, în sensul că nu există un acord între cercetători în privinţa direcţiilor de urmat. Accentul pus pe unele principii în detrimentul altora depinde de preferinţele lor. Aspectele personale îşi pot face simţită prezenţa, mai ales că motivaţiile nu sunt de ordin pur intelectual, ci deseori ţin, din păcate, de consideraţii de politica cercetării sau chiar de idiosincrazii şi orgolii.[93] Apoi, apare şi inerţia: odată ce te-ai hotărât asupra unor principii, e uneori greu să te îndepărtezi de ele, chiar dacă inadecvarea lor e lucru recunoscut. Ritmul vieţii ştiinţifice e tot mai intens, iar reorientarea îţi ia mult timp şi rişti să rămâi şomer. În cele din urmă,

vechile principii sunt deseori apărate de dragul lor, iar ştiinţa e pierdută din vedere.

Aceste consideraţii ne conduc la concluzia că unicitatea teoriilor nu e un lucru absolut, fiindcă, înainte de toate, trebuie acceptate principiile de bază. În ciuda pretinsei unicităţi a teoriilor, pot coexista candidaţi diferiţi urmărind acelaşi scop, dar având principii diferite. Gravitaţia cuantică – în care coexistă teoria corzilor, gravitaţia cuantică cu bucle, precum şi câteva variante alternative – e un exemplu. Ambiţiile acestor teorii sunt aceleaşi, dar nu şi fundamentele lor. Ele sunt asemenea unor plante care îşi caută drumu! spre lumină. Cum nu există speranţa unor observaţii care să indice calea de urmat, putem asista la un ocol lung printr-un labirint întunecat.

Pentru a face posibilă abordarea problemei unicităţii teoriei, o matematizare tranşantă e importantă în primă instanţă. Ea permite o formulare precisă, dar, în ce priveşte cunoaşterea naturii, ca prezintă şi un dezavantaj, căci observaţiile pătrund doar indirect, prin intermediul principiilor teoriei. Odată luată o hotărâre fundamentală în privinţa principiilor pentru a construi o teorie şi aparatul ei matematic, natura nu mai e consultată în analiza unicităţii. Chiar dacă astfel ar apărea o teorie matematic unică, ce-ar însemna ea pentru natura care a fost ignorată în tot acest proces? După cum am spus în introducere, nu e rostul fizicienilor să impună legi naturii, oricât de elegante matematic ar părea ele.

Odată ce matematica e pusă la treabă, reformulările sunt întotdeauna echivalente. Ceea ce obţii nu e cu nimic mai mult şi cu nimic mai puţin decât ce-ai presupus de la bun început, chiar dacă arată diferit. În fond, putem spune că toate teoremele matematice sunt banale. Rezultatul e întotdeauna conţinut în presupuneri, ce-i drept însă, de multe ori în chip ascuns. Pentru dezvăluirea lui apelăm la arta înaltă a matematicii,

dar ca însăşi nu poate sluji drept model al naturii. De aceea observaţiile rămân necesare pentru cristalizarea unei teorii, fie că e sau nu o consecinţă matematică unică a anumitor principii. Nicio matematică a unei „teorii universale”, oricât de sofisticată ar fi ea, nu le poate înlocui.

O singură teorie, o singură soluţie?
Ai grijă ce-ţi doreşti

Asemenea eşti duhului pe care-l înţelegi.[94]

Goethe, *Faust*

Ideal ar fi să avem o unică teorie, cu o unică soluţie. Dacă am putea calcula soluţia, măcar aproximativ, am putea descrie toate fenomenele naturii. Matematic, un asemenea lucru poate fi conceput – cu amendamentul, menţionat mai sus, că pentru unicitatea teoriei trebuie întotdeauna să facem anumite presupuneri. Dar, din perspectivă fizică, alta e situaţia. Oricât de uimitor ar părea, posibilitatea unei teorii fizice unice şi cea a unei soluţii unice sunt incompatibile!

Să presupunem că am avea o teorie cu o soluţie unică. Dacă ajungem să cunoaştem suficient de bine forma soluţiei ei, putem testa direct teoria comparând predicţiile ei unice cu observaţiile; teoria şi soluţia ei sunt ştiinţific testabile. Numărul observaţiilor rămâne întotdeauna finit, deşi cantitatea totală de date din fizica modernă a crescut enorm. Din punct de vedere matematic însă, putem deduce din soluţie oricât de multe proprietăţi – nu există o limită superioară. Ne putem mereu gândi! a noi teste observaţionale ale teoriei care n-au fost încă efectuate, teste pentru care tehnologia disponibilă de măsurare nu e îndeajuns de precisă. Nu putem niciodată verifica o teorie complet, ci cel mult putem arăta că e falsă, dacă pică la vreunul dintre teste[95] – fapt bine cunoscut în ştiinţă, dar care în contextul unicităţii teoriilor sau soluţiilor capătă o nouă semnificaţie.

Din moment ce nu putem niciodată testa complet o teorie unică, există mereu posibilitatea de a o modifica uşor, alegând, de pildă, valori diferite ale parametrilor, sau schimbând puţin principiile pe care se bazează. Dacă o facem cu suficientă atenţie, unicitatea soluţiei poate fi păstrată, rămânând în continuare în acord cu toate testele experimentale efectuate. Odată cu progresele viitoare din fizică, vor apărea observaţii care nu mai sunt compatibile cu fiecare soluţie a tuturor teoriilor anterior posibile, prin urmare, unele dintre acestea vor fi eliminate. Iar dacă fiecare dintre teoriile considerate are o soluţie unică, teorii întregi vor fi falsificate când soluţiile lor eşuează. Spaţiul de manevră pentru diferenţele dintre teorii scade pe măsură ce ştiinţa progresează, dar nu se va restrânge niciodată la o singură teorie posibilă. Dacă avem o teorie cu o soluţie matematică unică, în sens fizic teoria nu poate fi unică.

Inversând logic această afirmaţie, rezultă că o teorie unică nu poate avea o soluţie unică, dar trebuie să ţinem cont aici de subtila diferenţă dintre unicitatea matematică şi cea fizică. Rezultate recente par să confirme parţial această deducţie în privinţa teoriei corzilor, care avea pretenţii de unicitate matematică. În căutarea acelor soluţii ale teoriei corzilor care ar putea descrie cele mai simple proprietăţi cunoscute experimental ale particulelor elementare, a apărut un întreg peisaj de soluţii uşor diferite, al căror număr e incomparabil mai mare decât cel al tuturor protonilor din univers, iar fiecare dintre soluţii e compatibilă cu experimentele efectuate până acum. (Deşi acest număr e enorm şi devastator pentru predicţiile de unicitate a teoriei, simplul fapt de a putea estima numărul soluţiilor e o performanţă impresionantă.)

Aceasta ne aduce aminte de un precedent din filosofie, morala jucând rolul gravitaţiei cuantice.

De-a lungul secolelor, mulţi filosofi încercaseră să construiască o teorie unică a moralei, întemeiată pe principii clare. Cel mai cunoscut dintre exemple este pesemne imperativul categoric kantian, ca principiu general din care să fie deduse regulile individuale ale comportamentului. Avem de-a face cu aceeaşi problemă ca în teoria corzilor: nobilele principii ale teoriei admit nenumărate soluţii concrete, fără să fie de folos în selectarea unui set aplicabil. Nietzsche o spune cel mai limpede:

> […] o uriaşă perspectivă nouă i se deschide, viziunea unei posibilităţi îl cuprinde ca o ameţeală, orice fel de neîncredere, bănuială, teamă iese la iveală, credinţa în morală, în orice morală, se clatină – în sfârşit capătă glas o nouă cerinţă. Să o rostim, această *cerinţă nouă:* avem nevoie de o *critică* a valorilor morale, *în primul rând trebuie pusă în discuţie însăşi valoarea acestor valori …*[96] [97].

Într-o asemenea situaţie, fizica procedează totuşi altfel decât teoria moralei. Deşi mulţi fizicieni continuă să spere că dezvoltările ulterioare ale teoriei vor conduce la constrângeri suplimentare asupra soluţiilor, reducând puternic numărul lor, alţii transformă necesitatea într-o virtute, declarând pur şi simplu că studiul acestui set enorm e o nouă disciplină. Nu mai pot fi obţinute predicţii fizice dintr-o soluţie concretă? Să apelăm atunci la argumente probabiliste. Dacă găsim suficient de multe soluţii eu o anumită proprietate, să zicem că ea e valabilă şi pentru universul nostru! implicit, mai facem şi o altă presupunere: universul nostru e unul tipic între toate cele matematic posibile. Aceasta e o afirmaţie netestabilă fizic, fiindcă nu avem la dispoziţie decât un singur univers, şi nu avem cu ce compara tipul lui. Din păcate, multe argumente probabiliste, cu numărul lor uriaş de soluţii, seamănă cu o încercare disperată în stilul

lui Zenon: în loc să se aibă în vedere condiţiile concrete ale universului, accesibile nouă, e introdus un număr imens de lumi posibile. Problemele lumii noastre (desigur, doar în descrierea ei teoretică) dispar în oceanul nemărginit ai utopiilor, pentru a nu fi niciodată rezolvate.

CAPITOLUL 11.
Limitele ştiinţei şi nobleţea naturii

> Această nobilă iluzie metafizică se adaugă ca un instinct ştiinţei şi o mână iarăşi şi iarăşi spre limitele ei, unde ea trebuie să se prefacă în *artă:* acesta şi este *adevăratul el al întregului proces.*
>
> Friedrich Nietzsche, *Naşterea tragediei*[98]

Ideea (sau fantezia?) unei teorii universale e veche şi puternică, aşa încât nu-i de mirare că a stat la baza unor societăţi secrete cum au fost pitagoreicii sau rozacrucienii. Abia recent a pătruns în ştiinţă, iar datorită dificultăţii subiectului, ar putea părea iarăşi ezoterică. Uneori afirmaţiile centrale ale teoriilor iau forma unei reţele dense de conjecturi cuplate (dar nedemonstrate), dificil de sesizat chiar şi pentru iniţiaţi. Mai ales în asemenea cazuri există riscul ca întreg edificiul să se prăbuşească asemenea unui castel de cărţi de joc, dacă încearcă cineva să-i verifice serios soliditatea.

Conform gândirii pitagoreice, numerele întregi joacă rolul cantităţilor elementare. Aceasta nu e, desigur, o teorie universală, ci un principiu călăuzitor pentru alte consideraţii. Dacă ipoteza asta e corectă, atunci tot ce există în lume trebuie să poată fi exprimat prin numere întregi sau prin raporturi de numere întregi (fracţii). Pitagoreicii au ajuns la rezultate matematice remarcabile – care

însă, de pildă, teorema lui Pitagora, nu pot fi atribuite unuia sau altuia dintre ei –, dar teoria lor avea un neajuns fundamental: nu totul poate fi exprimat ca raport de numere întregi. Diagonala pătratului cu latura de un metru are, în metri, o lungime egală cu radical din doi: nu e un raport de întregi, ci un număr iraţional. Acest neajuns a fost recunoscut încă din epoca pitagoreică şi a constituit un şoc din care acea şcoală nu şi-a mai revenit vreodată, în ciuda încercărilor de a muşamaliza rezultatul defavorabil.

Ipotezele şi conjecturile nedemonstrate joacă un rol important în ştiinţă, fiindcă, dacă sunt suficient de solide, pot stimula cercetările ulterioare. Chiar dacă se dovedesc a fi false, ele contribuie în chip esenţial la progresul cunoaşterii. Este o ispravă remarcabilă demonstrarea iraţionalităţii lui radical din doi – ba chiar şi numai punerea problemei de a-l reprezenta ca o fracţie. Însuşi accentul pus pe principii fixe îi stimulează deseori pe oamenii de ştiinţă critici să demonstreze că sunt false, în general, nu e vorba aici de neîncredere, ci de dorinţa de a avea cât mai multă încredere în principii. Diversele şcoli de gândire, cum sunt şi acelea care se ocupă de teoriile gravitaţiei cuantice, trebuie să dea dovadă de deschidere, aşa încât adepţii lor să permită accesul celor din afară şi să-i asculte. Pitagoreicii au picat la acest test şi s-au străduit în zadar să-şi păstreze statutul ascunzând adevărul. Revizuirea unor principii, ca răspuns la problema lui radical din doi, le-ar fi diminuat pesemne întru câtva autoritatea, dar ar fi permis supravieţuirea şcolii pe baza părţilor valabile ale teoriilor ei.

În aceeaşi perioadă presocratică, o tradiţie cu torul diferită domnea în cosmologie şi filosofie: cea a competiţiei deschise între mici şcoli, precum acelea menţionate în capitolul dedicat cosmogoniei. Perspectiva dominantă aici era cea a raţionalismului critic; teoriile erau elaborate

raţional şi examinate critic. Această competiţie a generat o serie de abordări şi de perspective cosmologice noi, cu nimic mai prejos decât cele pitagoreice.

Asemenea caracteristici diferite pot fi întâlnite şi în cercetarea modernă, în funcţie de personalităţile oamenilor de ştiinţă implicaţi.[99] Componenta umană a ştiinţei nu trebuie subestimată. Percepţiile noastre fundamentale şi mecanismele care le procesează au apărut prin adaptare evolutivă la condiţiile de pe Pământ; acum ele sunt antrenate într-un efort de a înţelege întregul univers, şi la scară mică, şi la scară mare. Mintea omenească a obţinut succese uimitoare, în care forţa ordonatoare a matematicii a jucat un rol decisiv. Putem însă fi siguri că nu suntem pe o cale greşită sau că simţurile noastre n-au ignorat elemente esenţiale ale lumii?

Ştiinţa nu poate niciodată elimina posibilitatea de a urma o cale greşită, dar îi poate reduce probabilitatea folosindu-se de versatilitatea spiritului critic, aşa cum a fost el cunoscut de presocratici. Este periculos ca majoritatea oamenilor de ştiinţă dintr-un domeniu cum e gravitaţia cuantică să apeleze necritic la aceleaşi metode. Abordările diverse trebuie nu doar acceptate, dar şi sprijinite, mai ales dacă nu există încă observaţii care să indice corectitudinea uneia sau alteia dintre abordări. Tendinţa prea pronunţată de a crea subgrupuri ştiinţifice – secrete sau deschise – e un dezavantaj, fiindcă cercetarea individuală e prea lesne suprimată. La capătul ştiinţei se află Adevărul – cel puţin aşa sperăm. În privinţa asta, garanţia noastră e observaţia, confirmarea obiectivă a Naturii, căci Natura nu poate fi mituită (deşi pot apărea tentative de mituire). Dar nu poate învinge decât adevărul căruia i se dă ocazia să concureze.

Din păcate, în cercetarea actuală devine foarte uşor ca o singură direcţie sau câteva să exercite o

puternică dominaţie: odată ajunsă într-o poziţie influentă, deseori graţie şansei sau modei, o direcţie de cercetare se poate întări pe sine atrăgând fonduri şi stimulând noi angajări. Prin urmare, în domeniile de graniţă lucrează relativ puţini cercetători. Mici fluctuaţii în echilibrul de forţe dintre diversele abordări în aceste domenii au consecinţe mult mai grave decât în domeniile ştiinţifico solid ancorate. Din perspectiva politicii cercetării, e de fapt în interesul unei discipline noi să fie eliminată concurenţa directă cu abordările alternative. O tendinţă prea puternică de excludere poate fi contracarată doar de comitete de supraveghere independente, care să combată nepotismul intelectual.

În ciuda progresului aproape ameţitor al ştiinţei, nu trebuie să uităm limitările ei, care apar limpede mai ales la frontierele domeniului. Am văzut exemple: peisajul vast al soluţiilor din teoria corzilor considerat unic; sau posibilitatea uitării cosmice din cosmologia cuantică cu bucle, în ciuda capacităţii teoriei de a explica evenimente dinainte de big bang. Nu-i exclus ca asemenea limitări să fie depăşite, dar deocamdată trebuie să ţinem cont de ele.

Faptul însuşi de a ajunge să înţelegem natura e uimitor. Limitările nu scad cu nimic această înfăptuire, ci doar confirmă ceea ce Immanuel Kant considera că e nobleţea naturii, începând cu natura umană, pe care, în *Critica raţiunii practice*, o caracterizează astfel:

> Această Idee de personalitate care deşteaptă respect, care ne pune înaintea ochilor caracterul sublim al naturii noastre (potrivit menirii ei), şi care, lăsându-ne în acelaşi timp să observăm deficienţa adecvării purtării noastre faţă de ea şi distrugându-ne astfel îngâmfarea, este firească şi uşor perceptibilă chiar raţiunii omeneşti celei mai comune.[100]

Spre sfârşitul *Criticii* sale, el abordează întreaga natură:

> Primul spectacol al unei multitudini nenumărate de lumi îmi distruge oarecum importanţa mea de *creatură animală* care, după ce a fost, pentru scurtă vreme (nu se ştie cum), înzestrată cu forţă vitală, trebuie să restituie planetei (un simplu punct în univers) materia din care a devenit. […] Numai că admiraţia şi respectul pot să incite într-adevăr la cercetare, dar nu pot înlocui lipsa ei. Ce este de făcut, pentru a o întreprinde într-un mod util şi potrivit cu măreţia obiectului? Exemple pot servi aici de avertisment, dar şi de model. […] astfel vom împiedica pe de o parte eroarea unei judecăţi încă rudimentare şi neexercitate, iar pe de altă parte (ceea ce e mult mai necesar) elanurile geniale prin care, cum se întâmplă de obicei cu adepţii pietrei filosofale, fără nicio cercetare metodică şi cunoaştere a naturii, au promis comori imaginare şi au risipit pe cele adevărate.

Kant a încercat chiar să întemeieze pe asta posibilitatea unei legi morale universale. Pentru cosmologie e de-ajuns să apreciezi corect domeniul cunoaşterii ştiinţifice privind lumea întreagă, într-un cadru pe cât de larg e nevoie, dar nu mai larg. Succesul orbeşte adesea, după cum orbea şi înainte de apariţia relativităţii generale sau a mecanicii cuantice:

> *Hybris* este astăzi întreaga noastră atitudine faţă de natură, siluirea ei cu ajutorul maşinilor şi al atât de neşovăitoarei inventivităţi a inginerilor şi tehnicienilor; *hybris* este atitudinea noastră faţă de Dumnezeu, vreau să

> spun faţă de un oarecare păianjen al unor pretinse scopuri şi moralităţi […][101]

Recunoaşterea nobleţei naturii presupune şi acceptarea faptului că descrierile pe care i le putem noi da sunt incomplete. Cum se întâmplă asta în gravitaţia cuantică? Teoria corzilor ne impresionează cu magia ei şi cu posibila ei formulare matematică unică, dar, la fel ca mirosul mefistofelic sulfuros, rămâne gustul amar al peisajului imens şi dezordonat al soluţiilor. Apoi, dinamica gravitaţiei cuantice cu bucle e atât de complicată, încât îi sperie probabil pe mulţi cercetători la prima vedere, aşa cum Duhul îl sperie pe Faust. Poate că întrezărim adevărata natură a lumii într-una din aceste forme, dar n-o ştim şi poate că n-o vom şti niciodată.

În acest context s-a vorbit deseori despre sfârşitul fizicii – în sensul pozitiv, al cunoaşterii presupus complete, şi în cel negativ, al incurabilei înstrăinări de realitate. Să ne aducem însă aminte ce drum a parcurs fizica de la începuturile ei până în prezent. Vor apărea noi idei, cele false vor fi eliminate. Acest proces – iar nu o dominaţie completă asupra naturii – e scopul ştiinţei. Incompletitudinea înţelegerii noastre, altminteri inevitabilă, nu face să scadă sentimentul de uimire pe care ni-l trezeşte natura – şi care i-a făcut pe mulţi oameni de ştiinţă să-şi aleagă profesiunea şi i-a îndemnat pe profani să se intereseze de rezultatele ştiinţifice.

Este de aşteptat ca în viitorul previzibil să apară descoperiri importante în gravitaţia cuantică. Teoria cunoaşte în permanenţă progrese, iar unele rezultate surprinzătoare obţinute în ultimii ani ne dau speranţa că aplicarea aparatului matematic va dezvălui noi fenomene. Cosmologia va deveni mai precisă graţie noilor tehnologii, ajungând să privească înapoi în timp către un trecut tot mai

îndepărtat şi să măsoare efecte ale gravitaţiei cuantice.

Cât de mult ne vom putea întoarce în timp? Vom ajunge oare să vedem, cu o precizie care satisface standardele ştiinţei, forma universului dinainte de big bang? Răspunsul la asemenea întrebări rămâne în suspensie. Avem o mulţime de indicii şi de modele matematice pentru ce putea să se fi petrecut. Un ansamblu de rezultate din gravitaţia cuantică a dezvăluit diferite fenomene importante pentru a descifra ce s-a întâmplat la big bang. Pentru a face însă o extrapolare, precizia cu care ar trebui să cunoaştem parametrii cosmologici e mult mai mare decât cea accesibilă în prezent. Ceea ce nu înseamnă însă că n-am putea răspunde la întrebări privind preistoria universului. Cosmologia şi cercetările teoretice vor conduce la descoperiri pe care nu le putem anticipa. Poate că printre ele se vor afla şi informaţii privind universul dinainte de big bang.

---

[1] Gianni Caravaggio (n. 1968) este un artist plastic italian stabilit în Germania. *(N. t.).*

[2] Rüdiger Vaas este un jurnalist german specializat în ştiinţă. *(N. t.).*

[3] Traducere de Francisc Grünberg, Editura Humanitas, Bucureşti, 1991. *(N. t.).*

[4] Rudolf Carnap, *An Introduction to the Philosophy of Science,* Dover Publications, New York, 1995, p. 207.

[5] Traducere de Mihai Nemeş, Editura Paralela 45, Piteşti, 2007. *(N. t.).*

[6] Alte exemple sunt oferite de principalele teorii prezentate în această carte: relativitatea generală şi mecanica cuantică. Spre deosebire de teoria lui Newton, ele au fost mai viu dezbătute la începutul lor, fiindcă au apărut într-o etapă mult mai târzie şi urmăreau să explice fenomene mai subtile. În aceste cazuri, precum şi în altele, este aproape şocant să vezi că nişte calcule matematice

– gândire pură – corespund atât de precis naturii. Deseori observaţiile au fost anticipate de predicţii îndrăzneţe, cum s-a întâmplat cu particulele elementare a căror existenţă a fost dedusă din consideraţii matematice de simetrie. Uneori, viziunile teoretice au fost incorecte, dar, dovedindu-şi validitatea în multe împrejurări, fizica teoretică a demonstrat că nu-şi datorează succesul hazardului. Încercările ei de predicţie sunt indispensabile în călăuzirea observaţiilor şi în conducerea fizicii către noi frontiere. Să-i fie confirmată una din idei, fie ea cât mică, e visul oricărui teoretician, dar puţini au izbândit. E ca şi cum ţi-ai închipui că joci şah, pentru a descoperi apoi că de fapt porţi o bătălie.

[7] Traducere de Ştefan Aug. Doinaş, Editura Humanitas, Bucureşti, 1994. *(N. t.).*

[8] Transformabilitatea spaţiului şi timpului are totuşi consecinţe în viaţa de zi cu zi, căci fără ea cantitatea de radioactivitate naturală la suprafaţa Pământului ar fi mult mai mică: miuonii (particule elementare produse în atmosfera superioară de razele cosmice care bombardează Pământul) n-ar mai ajunge altminteri la sol.

[9] Mai ales originea celor de energie foarte înaltă nu e complet înţeleasă, dar pare să se afle în nucleele galactice active din afara Căii-Lactee.

[10] În *Filosofia greacă până la Platon*, Editura Ştiinţifică şi Enciclopedică, Bucureşti, 1979. *(N. t.).*

[11] Asemenea argumente ar putea fi indicii privind un plan de a evita predarea teoriilor complicate, care arareori apar în cursurile universitare standard.

[12] Pentru descoperirea aceasta, Hulse şi Taylor au primit în 1993 Premiul Nobel.

[13] „Cap” are aici sensul propriu de parte a corpului. Faptul că minţile europenilor şi americanilor sunt orientate uneori în direcţii diferite n-are nicio legătură cu asta.

[14] Prin urmare, ceasornicele încetinesc când ajung la altitudini mai joase. Lucrul acesta e valabil atâta timp cât ceasornicul rămâne în afara corpului principal al Pământului sau în atmosfera uşoară. Dacă un ceasornic e aruncat într-un puţ adânc, încetinirea bătăilor lui e oprită, ca rezultat al distribuţiei de materie care înconjoară acum ceasornicul din toate părţile.

[15] Iniţial, sistemul GPS a fost dezvoltat în scopuri militare şi e în continuare supravegheat de departamentul american al apărării. Semnalele de la sateliţi disponibile pentru scopuri civile au fost o vreme în mod intenţionat perturbate, pentru a nu permite măsurători de poziţie cu o precizie mai mare de o sută de metri. Apoi au apărut tot mai multe aplicaţii profitabile financiar, iar dispozitivul de perturbare a fost scos din funcţiune în mai 2007, în urma unei directive a administraţiei Clinton.

[16] Friedrich Nictzsche, *Genealogia moralei. (Ştiinţa voioasă. Genealogia moralei. Amurgul idolilor,* traducere de Liana Micescu, Editura Humanitas, Bucureşti, 1994 – *n. t.*).

[17] Fără îndoială că unii cititori vor dori, cel puţin din când în când, o asemenea soartă cărţii de faţă.

[18] Un exemplu extrem pentru o opinie destul de răspândită e dat de afirmaţia fizicianului Frank Tipler făcută la CBS 11 TV (Dallas/Fort Worth) pe 9 mai 2007: „Dumnezeu este singularitatea cosmologică. Eu urmez pur şi simplu vechea tradiţie spunând că ştiinţa supune învăţăturile religiei la testul experimentului, iar noi găsim că Dumnezeu există.”.

[19] Până ca Hawking să obţină acest rezultat, Vladimir Belinski, Isaak Halatnilov şi Evgheni Lifşiţ credeau că pot demonstra absenţa singularităţilor în soluţiile spaţio-temporale generice ale ecuaţiilor lui Einstein şi că metodele matematice ale lui Hawking, mai puternice, nu vor aduce decât corecţii la rezultatele lor. Totuşi, analiza lor încă e folosită pentru înţelegerea spaţiului-timp în apropierea singularităţilor şi reprezintă o contribuţie importantă la relativitatea generală.

[20] Traducere de Radu Gabriel Pârvu, Editura Humanitas, Bucureşti, 2012. *(N. t.).*

[21] Oscar Wilde, *De profundis.*

[22] Traducere de Sanda Aronescu, Editura RAO, Bucureşti, 1995. *(N. t.).*

[23] Traducere de Sanda Aronescu, Editura Polirom, Iaşi, 2014. *(N. t.).*

[24] Aceasta e o problemă serioasă pentru procesul de transportare printr-un fascicul, prezentat în serialul SF *Star Trek*, în

care un obiect sau un om e complet măsurat, anihilat şi reconstruit identic în alt loc. Primul pas, măsurarea completă, e imposibil din cauza principiului de incertitudine; al doilea, anihilarea, pare mult mai uşor. Creatorii serialului afirmă că problema se presupune a fi rezolvată de un aşa-numit compensator Heisenberg, care evită relaţia de incertitudine. Din păcate, nu prea dispunem de informaţii. Întrebat cum funcţionează compensatorul Heisenberg, un consultant tehnic al serialului a răspuns: „Funcţionează foarte bine, mulţumesc de întrebare."

[25] Există şi alte energii asociate funcţiilor de undă sferice, dar ele corespund unor raze mai mari. Cea mai apropiată de proton e cea stabilă, fiindcă nu poate fi comprimată mai mult. Dacă am încerca s-o facem, am intra în contradicţie cu relaţia de incertitudine, limitând simultan incertitudinea pentru poziţie şi cea pentru viteză: comprimarea funcţiei de undă reduce incertitudinea în poziţie, pentru că ajungem să cunoaştem mai precis dimensiunea undei. Incertitudinea în viteză trebuie să se modifice corespunzător când raza scade, căci electronul trebuie să rămână într-o regiune mai mică. Incertitudinile limitează deci orbitele electronului.

[26] Termenul „lungime Planck" a fost născocit mai târziu de John Wheeler, care a înţeles rolul ei în gravitaţia cuantică.

[27] Traducere de Ion Frunzetti şi N. Parocescu, Editura Univers, Bucureşti, 1985. *(N. t.).*

[28] Friedrich Nietzsche, *Ştiinţa voioasă.*

[29] În *100 Years of Relativity' Space-Time Structure: Einstein and Beyond,* editor Abhay Ashtekar, World Scientific, Singapore, 2005, p. 18.

[30] Există chiar şi o teorie atât de misterioasă, că nici măcar numele nu i se cunoaşte, cu excepţia primei sale litere. Despre această literă se spune că ar veni de la „magic" sau „misterios", dar şi de la cuvinte precum „membrană"; se mai spune şi că ar fi imaginea reflectată în raport cu o axă orizontală a iniţialei creatorului ei.

[31] Goethe, *Faust,* traducere de Lucian Blaga, Editura de Stat pentru Literatură şi Artă, Bucureşti, 1955. *(N. t.).*

[32] În *Filosofia greacă până la Platon*, Editura Ştiinţifică şi Enciclopedică, Bucureşti, 1979. *(N. t.).*

[33] Deşi gradul lor de matematizare diferă, teorii, în acest sens, există nu doar în fizică, ci şi în alte domenii ale ştiinţei. Un exemplu bine-cunoscut e evoluţia din biologie. Pe baza principiilor selecţiei şi mutaţiei, ea poate explica bogăţia speciilor de pe Pământ, precum şi multe detalii caracteristice.

[34] O prezentare amănunţită a teoriei corzilor se găseşte în Brian Greene. *Universul elegant,* Editura Humanitas, Bucureşti, 2009. *(N. t.).*

[35] Ideile lui Leonard Susskind sunt prezentate pe larg în cartea sa *Peisajul cosmic,* Editura Humanitas, Bucureşti, 2012. *(N. t.).*

[36] Traducerea tui Lucian Blaga, ed. cit. *(N. t.).*

[37] În unele cercetări importante, lor li s-a alăturat Ted Jacobson.

[38] Aceste aproximaţii se numesc *lattice gauge theories* (teorii de etalonare în reţea). Când a început să lucreze în gravitaţia cuantică cu bucle, Smolin avea deja o experienţă bogată într-o versiune numită *Hamiltonian lattice gauge theory*, ceea ce l-a ajutat s-o aplice gravitaţiei. Un cadru non-aproximativ asemănător, dar nu pentru gravitaţie, fusese elaborat anterior de Rodolfo Gambini şi Antoni Trias – fără să fie cunoscut la început de Rovelli şi Smolin.

[39] În traducere românească a apărut la Editura Humanitas cartea Iui Lee Smolin *Spaţiu, timp. gravitaţie,* care prezintă, şi ea, problemele gravitaţiei cuantice. (*N. t.).*

[40] Primul pas important a fost făcut de un alt fizician matematician mai în vârstă, Chris Tsham. Curând, câteva rezultate au fost obţinute de Jerzy Lewandowski, Don Marolf, Jose Mourâo şi Thomas Thiemann, în mod independent, Rodolfo Gambini şi Jorge Pullin au elaborat metode matematice alternative.

[41] S-a dovedit de asemenea că era necesară o reformulare (făcută de Fernando Barbero în 1995) a reformulării iniţiale date de Ashtekar relativităţii generale.

[42] Această observaţie e cel mai bine ilustrată de afirmaţia lui Lee Smolin, de la petrecerea aniversară a lui Ashtekar din 2009, cum că a învăţat de la acesta diferenţa dintre idei şi rezultate.

[43] Buclele Wilson au fost numite după Kenneth Wilson, care le-a introdus într-un cadru mai general în teoriile cuantice de câmp,

fără legătură cu gravitaţia.

[44] De pildă în colaborare cu Thiemann şi Kristina Giesel.

[45] Exista un motiv întemeiat pentru această ezitare iniţială: el credea că se poate descurca mai bine şi îşi elaborase propria lui metodă de mediere a stărilor simetrice. Când a ţinut un seminar despre această metodă, am arătat că ea va produce mereu stări care se anulează complet: simetria nu numai că ar elimina structurile, dar în acest caz ar face să dispară totul. Ashtekar şi-a dat seama imediat că aveam dreptate, şi a început să sprijine cosmologia cuantică cu bucle. A dat dovadă de noblețe combinată cu o trăsătură de caracter pe care am învăţat s-o preţuiesc mult. În ciuda unor efecte secundare uneori neplăcute: receptivitatea faţă de opiniile contrare şi spiritul critic sunt esenţiale în căutarea adevărului. Eforturile ştiinţifice pot da naştere la cumplite dispute emoţionale, însă de regulă ele sunt constructive, fiindcă în felul acesta se elaborează teorii, se elimină erori şi sunt sugerate noi idei. Când o asemenea dezbatere se încheie, rămâi cu un corp de cunoştinţe asupra căruia toţi cei implicaţi au căzut de acord.

[46] Vezi în *Universul elegant* de Brian Greene, ed. cit., capitolul 14. *(N. t.)*.

[47] Programele de calculator ale lui Pawlowski au jucat un rol important în această cercetare.

[48] Oricine poate participa la această analiză a datelor graţie programului EinsteinHome (http://einstein.phys.uwm.edu). E un *screen saver* care foloseşte timpul mort al calculatorului pentru analiza datelor de observaţie. În prezent, vreo 100.000 de computere din mai multe ţări participă, oferind cercetării în domeniul gravitaţiei sprijin computaţional.

[49] Traducere de Gh. Mihalache-Buzău şi Victor Munteanu, Editura Biblioteca Bucureştilor, Bucureşti, 2009. *(N. t.)*.

[50] Friedrich Schiller, *Was heisst und zu welchen Ende studiert man Universalgeschichte?* publicat în *Der Teutsche Merkur*, 1789 (pp. 127–128).

[51] Nu toate descrierile universului se conformează acestei perspective de sus în jos. După cum vom vedea în problema unicităţii soluţiilor (capitolul 9), cosmologia cuantică cu bucle poate oferi condiţii fundamentale pentru forma soluţiilor ei, fără să se

refere la starea din prezent. Astfel, ea are o forţă de predicţie mai mare şi e mai îndrăzneaţă.

[52] Despre teoria matematică a haosului, vezi Ian Stewart, *Dă oare Dumnezeu cu zarul?,* Editura Humanitas, Bucureşti, 2015. *(N. t.).*

[53] Lumea preferă o supraputere copleşitoare, care răstoarnă de una singură raportul de forţe. O asemenea perspectivă neoconservatoare – ignorând multe aspecte cuantice – e deseori susţinută în cosmologie, presupunându-se că o unică forţă repulsivă e de-ajuns pentru exorcizarea singularităţii ameninţătoare şi eliberarea întregului univers. Din păcate, soluţiile bazate pe luarea în considerare a unui singur mecanism ignoră de multe ori aspectele concrete: în lumea reală, lucrurile arată mai puţin îngrijit, iar diferite forţe intră în joc. În universul timpuriu, nu avem numai contribuţia repulsivă a forţei gravitaţionale, ci, în această fază densă, fierbinte şi haotică, sunt relevante şi alte forţe cuantice ubicue. Pentru a înţelege clar ce se întâmplă, trebuie să cunoaştem în amănunt proprietăţile stării. Cum anume rezolvă singularitatea forţa repulsivă a gravitaţiei cuantice rămâne de determinat – dar, la nivel fundamental, pe baza comportamentului energiei într-un spaţiu-timp discret, e limpede că o face cumva.

[54] Traducere de Maria Banuş, în Rainer Maria Rilke, *Versuri,* Editura Tinetului, Bucureşti, 1966. *(N. t.).*

[55] Pe atunci, volumul universului observabil era de aproximativ un miliard de ori mai mic decât în prezent.

[56] Antena lui Penzias şi Wilson nu fusese destinată măsurătorilor cosmologice, abia mai târziu descoperirea lor a fost legată de cosmologie. Alţi cercetători plănuiau să facă experimente similare, dar Penzias şi Wilson le-au luat-o înainte. Între aceşti cercetători s-a numărat şi David Wilkinson, nume pe care îl regăsim legat de satelitul WMAP, cel care oferă în prezent datele cele mai precise despre radiaţia cosmică de fond.

[57] Pentru o prezentare amănunţită a descoperirii radiaţiei cosmice de fond, vezi Simon Singh, *Big bang.* Editura Humanitas, Bucureşti, 2006. *(N. t.).*

[58] Traducerea iui Ştefan Aug. Doinaş, Editura Univers, Bucureşti, 1982. *(N. t.).*

[59] Combinarea tuturor observaţiilor de la un moment dat nu ne dezvăluie decât o parte finită din univers. Dacă partea pe care am văzut-o până acum nu e decât o regiune ordonată dintr-un univers mult mai neregulat? Această posibilitate nu poate fi niciodată respinsă. Predicţiile cosmologice pe termen foarte lung pot depăşi această dilemă doar dacă se fac presupuneri suplimentare sau dacă se postulează principii generale.

[60] Reines şi Cowan se gândiseră chiar să pună detectorul în apropierea unei bombe nucleare care explodează.

[61] Am putea la fel de bine numi accelerarea actuală „inflaţie”, în loc de energie întunecată. Cum însă avem de-a face cu două fenomene distincte, ele trebuie separate conceptual. Fiindcă a fost studiată mai întâi expansiunea accelerată din universul timpuriu, ea a primit deja numele de „inflaţie”..

[62] Mulţi cosmologi sunt atraşi de ideea că inflaţia rezultă din gravitaţia cuantică. În cosmologia cuantică cu bucle, am publicat în 2003 primul articol (judecând retrospectiv, probabil greşit) pe tema asta, care se voia doar un indiciu de început şi nu trebuia luat prea în serios. Mai târziu am aflat că articolul a reprezentat pentru Parampreet Singh, actualmente cercetător activ în cosmologia cuantică cu bucle, principalul stimul care l-a făcut să intre în domeniu.

[63] De ce în prezent cantitatea de materie nu e egală cu cea de antimaterie e o problemă rămasă în suspensie. Aceste două ingrediente fie au fost separate unul de altul, fie au apărut în cantităţi diferite printr-o asimetrie a producerii lor. Niciuna din aceste posibilităţi nu e susţinută până la capăt de procesele fizice cunoscute, după cum vom arăta pe scurt în capitolul următor.

[64] Denumirile de „materie” şi „antimaterie” sunt, desigur, o convenţie. Materia este ceea ce vedem în mod obişnuit, şi se află într-o relaţie de complementaritate cu antimateria produsă la energii înalte. Din moment ce nu cunoaştem cauza pentru care materia e dominantă, nu există vreo proprietate care s-o distingă fizic; ceea ce o distinge e doar faptul aparent întâmplător că predomină în cosmosul nostru.

[65] Folosirea acestui mecanism ca test în gravitaţia cuantică a fost propusă în 1997 de Giovanni Amelino-Camelia, John Ellis,

Nikolaos Mavromatos, Dimitri Nanopoulos şi Subir Sakar. Unii dintre ei au elaborat modele şi au estimat întârzierile în timp în anumite versiuni nestandard (numite necritice) ale teoriei corzilor; teoria standard, critică, a corzilor nu e de aşteptat să conducă la întârzieri în timp detectabile, fiindcă păstrează în mare măsură structura clasică a spaţiului-timp. În gravitaţia cuantică cu bucle, asemenea modele au fost create de Rodolfo Gambini şi Jorge Pullin pentru fotoni, în 1998, şi de Jorge Alfaro, Hugo Morales-Tecotl şi Luis Urrutia pentru neutrini, în 1999. Detectarea radiaţiei gama de energie înaltă, provenind de la explozii foarte îndepărtate, deschide acum posibilitatea ca teoriile gravitaţiei cuantice să fie testate şi să se impună condiţii asupra parametrilor liberi.

[66] Exploziile de raze gama au fost descoperite de satelitul Vela al armatei americane, care avea ca misiune să detecteze explozii nucleare sovietice în spaţiu.

[67] Mişcarea tuturor stelelor nu are însă loc într-un plan fix. O animaţie 3D poate fi văzută la http://www.mpe.mpg.de/ir/GE/index.php.

[68] Pasajele în italice sunt ficţiune şi urmăresc să ilustreze speculaţiile pe care bazele matematice ale fizicii moderne le interzic, dar care altminteri ar fi posibile.

[69] Pentru găurile negre nesimetrice sferic, dar tipice în univers, aflate în rotaţie, apar totuşi noi fenomene. De pildă, în conformitate cu procesul Penrose, obiectele care trec în apropierea unei găuri negre în rotaţie pot fi accelerate pe seama vitezei de rotaţie a acesteia; oprind rotaţia, se poate în principiu câştiga o cantitate de energie de până la corespondentul a 30% din masa găurii negre. E o cantitate enormă dacă o comparăm cu procentajul energiei obţinute prin reacţii nucleare în raport cu masa combustibilului.

[70] Sau să scadă, după o perioadă de încălzire globală.

[71] Propunerea lui Unruh a apărut ca o ilustrare metaforică într-o discuţie la un colocviu despre găurile negre. În prezent sunt efectuate experimente reale, în diferite versiuni.

[72] Ceea ce nu însemnă că studiul radiaţiei corpului negru nu poate conduce la descoperiri importante. E de-ajuns să menţionăm cercetările lui Planck sau cele asupra radiaţiei cosmice de fond.

[73] Primele contribuţii le aparţin lui Kirill Krasnov, Carlo Rovelli, Abhay Ashtekar, John Baez, Alejandro Corichi, Romesh Kaul şi Parthasarathi Majumdar.

[74] Cercetări asemănătoare au fost efectuate în paralel de Leonardo Modesto, precum şi de Viqar Husain şi Oliver Winkler. Recent, Christian Bohmer, Kevin Vandersloot, Rodolfo Gambini şi Jorge Pullin s-au întors la aceste probleme.

[75] Aplicarea acestui principiu e mai realistă, dar mult mai dificilă decât în cazul timpului matematic ideal; lucrul e cel mai bine exprimat în cuvintele lui Peter Bergmann, care, în anii ’60, a început să se ocupe de această problemă: „La o asemenea întrebare se poate răspunde dacă avem un set suficient de date iniţiale, dar îndeplinirea acestei sarcini cere un imens efort matematic.” Descrierea teoretică rămâne să fie completată; ea a cunoscut progrese graţie lui Carlo Rovelli şi a Biancăi Dittrich. Julian Barbour continuă şi el să abordeze problema.

[76] Traducere de Mircea Ivănescu, Editura Univers, Bucureşti, 1984. *(N. t.)*.

[77] Pentru chinezi, desenul craterelor lunare sugera forma unei broaşte. *(N.t.)*.

[78] Reprezentarea obişnuită, cea cu un fildeş întreg şi unul rupt, ca în figura 33, simbolizează combinaţia dintre perfecţiune şi haos în lumea reală; vezi de asemenea capitolul 11.

[79] *Apeiron* se traduce şi prin „nelimitat[11], şi prin „nedefinit[1]* (vezi Francis E. Peters, *Termenii filozofiei greceşti*, Editura Humanitas, Bucureşti, 1997). Deşi Bojowald traduce în engleză prin *unlimited,* mi s-a părut că a doua variantă e mai potrivită în contextul dat. Toate citatele legate de presocratici care urmează sunt preluate din *Filosofia greacă până la Platon* (Editura Ştiinţifică şi Enciclopedică, Bucureşti, 1979). (*N. t.)*.

[80] Fragmentele presocratice sunt preluate din ediţiile germane – *Philosophie von Platon bis Nietzsche,* Digitale Bibliothek, ed. a III-a, vol. 2, şi Hermann Diels, *Die Fragmente der Vorsokratiker: Griechisch und Deutxch,* ed. a IV-a, vol. I şi 2 (Weidmannsche Buchhandlung, Berlin, 1922).

[81] Citatul nu este din Heraclit, ci din Nietzsche, care interpretează şi rezumă ideile lui Heraclit în *Filozofia în epoca*

tragică a grecilor (Editura Humanitas, Bucureşti, 2012). *(N. t.).*

[82] Nu toate obiectele considerate la începutul secolului XX nebuloase sunt în realitate galaxii. Ceea ce numim azi în mod propriu nebuloasă e o aglomerare de gaze şi praf interstelar aflată în galaxia noastră, şi care, datorită structurii ei, are de asemenea o înfăţişare difuză. Pentru o relatare amănunţită a descoperirilor lui Hubble şi a evoluţiei modelelor cosmologice, vezi cartea lui Simon Singh *Big bang* (Editura Humanitas, Bucureşti, 2006). *(N. t.).*

[83] Este vorba de ideile economistului britanic John Maynard Keynes expuse în *Teoria generală a ocupării forţei de muncă, a dobânzii şi a banilor,* publicată în 1936. *(N. t.).*

[84] Cel puţin aşa s-a întâmplat în primii ani ai cosmologiei cuantice cu bucle. Între timp, s-a demonstrat că singularităţile pot fi evitate; problema acum este cum arată spaţiul-timp – iar ea necesită operarea cu mai multe detalii, care cu uşurinţă pot fi greşit interpretate. S-a vorbit, de pildă, despre marea „natură cuantică a big bang-ului", fără să se ştie că modelul folosit şi stările cuantice analizate în acest caz erau cu totul aparte – aveau un caracter prea particular pentru a trage concluzii precise despre big bang. Alt exemplu este afirmaţia *Loop quantum cosmos are never singular* (cosmosul cuantic cu bucle nu sunt niciodată singulare), al cărei conţinut e torturat: substantivul „cosmos" e la singular, dar suprapunându-i-se verbul „are" (sunt) e făcut în mod artificial să capete formă de plural. În asemenea cazuri, cercetând mai atent, afirmaţiile iniţiale trebuie revăzute.

[85] Modelul a fost apoi analizat de Ellis, Jefif Murugan şi Christos Tsagas.

[86] Într-o versiune diferită, această rezolvare a fost reluată mai târziu de Luca Parisi, Marco Bruni, Roy Maartens şi Kevin Vandersloot.

[87] O posibilitate mai complicată este ca universul să fi apărut în urmă cu un timp finit, conform conceptului clasic de timp, dar să fi existat dintotdeauna, în sensul evoluţiei cuantice. Lămurirea acestui paradox presupune înţelegerea diferenţei subtile dintre timpul clasic şi cel cuantic, şi, în cele din urmă, o înţelegere completă a timpului însuşi. Asemenea probleme, pline de dificultăţi nu doar tehnice, dar şi conceptuale, rămân încă în suspensie. În prezent se crede că gravitaţia cuantică cu bucle poate conduce la

această perspectivă himerică, în care apar şi trăsături ciclice, şi trăsături liniare, aşa cum se întâmplă în cazul uitării cosmice; acele tipuri de modele ar putea semăna cu un început inflaţionar spontan al universului, în sensul propus de Sean Carroll şi Jennifer Chen, în mod fundamental însă, în cosmologia cuantică cu bucle pare să existe întotdeauna un univers cuantic înainte de ceea ce gravitaţia clasică ar considera că e o singularitate.

[88] Vezi nota I de la capitolul 6.

[89] Traducere de Radu Gabriel Pârvu, Editura Humanitas, Bucureşti, 2012. *(N. t.).*

[90] Platon, *Opere VI,* Editura Ştiinţifică şi Enciclopedică, Bucureşti, 1989. *(N. t.).*

[91] Traducerea lui Ştefan Aug. Doinaş, ed. cit. *(N. t.).*

[92] Traducere de Liana Micescu, Editura Humanitas, Bucureşti, 1994. *(N. t.).*

[93] „Ceea ce ne incită să-i privim pe filosofi pe jumătate neîncrezător, pe jumătate batjocoritor este nu într-atât faptul că descoperim tară încetare gradul lor de inocenţă – că vedem cât de des şi cât de lesne se înşală şi se rătăcesc, pe scurt, copilăria şi puritatea lor cât pentru a vedea cu câtă lipsă de sinceritate dezlănţuie o mare zarvă virtuoasă de îndată ce se atinge, chiar de departe, problema veridicităţii lor. Ei se prefac cu toţii că şi-au descoperit şi obţinut opiniile prin exercitarea spontană a unei dialectici îngheţate, pure şi divin-nepăsătoare (spre deosebire de misticii de tot felul care, mai cinstiţi şi mai neciopliţi, vorbesc de «inspiraţia» lor): în vreme ce este vorba, în fond, de o afirmaţie arbitrară, de un capriciu, de o «intuiţie», şi, cel mai ades, de o aprigă dorinţă abstractizată şi căutată pe care o apără prin pretexte născocite ulterior; ei sunt cu toţii nişte avocaţi şi ades chiar apărători şireţi ai prejudecăţilor lor botezate de ei «adevăruri», ei sunt foarte departe de acel curaj al conştiinţei care îşi mărturiseşte sieşi minciuna, foarte departe de bunul gust al curajului care face ca acesta să şi rostească minciuna, fie pentru a pune în gardă un duşman sau prieten, fie din exuberanţă sau pentru a se ironiza pe sine” (Friedrich Nietzsche, *Dincolo de bine şi de rău* [Editura Humanitas, Bucureşti, 1991]). Exemple pot fi găsite şi în gravitaţia cuantică. Mai cu seamă în cosmologia cuantică, unde calculele matematice sunt ceva mai puţin complicate, iar miza e foarte mare,

apar asemenea dispute. Din fericire, fizica se supune observaţiilor experimentale, care pun capăt dorinţelor fierbinţi ale teoreticienilor.

[94] Traducerea lui Ştefan Aug. Doinaş, ed. cit. *(N. t.).*

[95] Fizicienii sunt un fel de călăi: treaba noastră cea mai nobilă, dar deloc plăcută, este să ucidem acele teorii care n-au dreptul să existe. Totuşi, majoritatea fizicienilor sunt sentimentali, deseori se îndrăgostesc de victimele lor. Sarcina devine cu atât mai complicată dacă teoria condamnată se întâmplă să fie chiar creaţia ta. Cele frumoase şi fermecătoare, mai ales, pot supravieţui mult după data expirării lor.

[96] Friedrich Nietzsche, *Genealogia moralei,* Prefaţă.

[97] *Genealogia moralei*, ed. cit. *(N. t.).*

[98] Traducere de Ion Dobrogeanu-Gherea şi Ion Herdan, Editura Pan, Iaşi, 1992. *(N. t.).*

[99] La fel ca multe altele, ştiinţa funcţionează cel mai bine într-un climat democratic, iar realizarea acestuia într-un anume domeniu depinde în mare măsură de etica liderilor lui. Unii sunt priviţi ca nişte zei, alţii vor să acţioneze ca nişte despoţi. Nu e prea mult spaţiu de manevră între regii veneraţi şi cei detestaţi. Pentru a judeca ce se întâmplă într-un domeniu, trebuie să cunoşti culisele, accesibile, în general, doar celor direct implicaţi. Cât priveşte gravitaţia cuantică cu bucle, pot spune că, deşi situaţia nu e fără cusur, în linii mari se apropie mult de ideal: există, desigur, un tiran neînfricat, dar ceilalţi sunt o bandă de anarhişti. E o comunitate plină de energie.

[100] Toate citatele din *Critica raţiunii practice* sunt preluate din traducerea (N. Bagdasar) publicată la Editura Ştiinţifică, Bucureşti, 1972. *(N. t.).*

[101] Friedrich Nietzsche, *Genealogia moralei.*

CUPRINS

Prefaţă
Introducere
CAPITOLUL 1. Gravitaţia. Atracţia masei
Legea newtoniană a gravitaţiei: Acţiunea la distanţă şi un neajuns fatal
Relativitatea spaţiului şi timpului: Transformări în staţiu-timp
Relativitatea generală: Spaţiul şi timpul se dezlănţuie
Spaţiul-timp curb: O scenă care se zguduie sub greutatea actorilor
Graniţele spaţiului şi timpului: Sfârşitul unei teorii
Absenţa respingerii: Pericolul de a fi prea atrăgător
CAPITOLUL 2. Teoria cuantică. Stabilitate incertă
Stabilitatea atomică: Preţul unei vieţi îndelungate
Funcţia de undă: Fluctuaţii, superpoziţii, limitări
Atomii: Stabilitate din inconstanţă
Limita clasică şi forţele efective: Spargerea valurilor
Radiaţia corpului negru: E simplu să te îmbraci în negru
Scările Planck: Despre enormitatea cuantică
CAPITOLUL 3. Un interludiu despre rolul matematicii. Începe lumea într-o ecuaţie?
Matematică doar de dragul ei? Matemagia
Utilizarea abuzivă a infinitului: Şmecheriile fizicii
Despre ipoteze şi teorii: Codul de conduită al teoreticianului
CAPITOLUL 4. Gravitaţia cuantică. Încercarea de a combina totul
Abordările gravitaţiei cuantice: Puterea stă în diversitate
Teoria corzilor: Cea mai bogată simfonie
Gravitaţia cuantică cu bucle: Atomi de spaţiu şi întuneric
Comparaţie: mere şi portocale

Gravitaţia cuantică cu bucle: Luminând întunericul
Începuturile: Jocuri mintale
Mai multe detalii: Garduri, fibre, filigrane
Universul discret: Ţeserea istoriei lumii
Cosmologia cuantică cu bucle: Netezirea atomilor
Mai puțin înseamnă mai mult: Cum să câștigi timp
Evitarea singularității: Ricoşeul întregului univers
Despre folosirea matematicii – un exemplu: Trecerea prin starea infernală
Aşadar, ce s-a întâmplat de fapt înainte de big bang? Întrebarea ultimă
Impenetrabilitate: Prin ceața trecutului
Uitarea cosmică: Amintiri înceţoşate
Limite: Nu există oare niciun răspuns ultim?
CAPITOLUL 5. Cosmologia observaţională. Sondarea întregului univers, a trecutului şi viitorului
Triada cosmologiei observaţionale: Un triumvirat puternic
Fondul cosmic de microunde: Distribuţii cereşti
Cartografierea galaxiilor: Milioane şi milioane de Căi-Lactee
Supernovele: Ultimele cuvinte înţelepte ale stelelor muribunde
Presiunea negativă: Respingerea greu sesizabilă
Energia întunecată: Cele 70 de procente necunoscute
Inflaţia: Speculaţii privind universul timpuriu
Poate fi observată gravitaţia cuantică? În căutare de indicii
Alte posibilități de testare: Să nu renunţi niciodată
Nucleosinteza big bang: Prepararea elementelor
Spaţiul-timp ca un cristal: Giuvaere goale
Găurile negre: Lumi ale întunericului
CAPITOLUL 6. Găurile negre. Colaps şi un final fericit?
Calea către o gaură neagră: A te juca cu focul
Primele stele: Arderea combustibilului
Piticele albe: Reci şi compacte
Stele neutronice: Ultima revoltă

Singularitatea centrală: Un înspăimântător punct în timp
Orizonturi: Punctul dincolo de care nu există cale de întoarcere
Singularităţi nude şi cenzura cosmică: Lege şi decenţă
Gravitaţie analogă: Găuri negre comune
Teoria cuantică a găurilor negre: Să-l faci pe cel fără glas să vorbească
Evoluţie cosmică? Naşterea lumilor
Radiaţia Hawking şi pierderea informaţiei: Dispare totul în neant?
Gravitaţia cuantică a găurilor negre: Viaţa trebuie să continue
CAPITOLUL 7. Săgeata timpului. O lume care îmbătrâneşte
Conceptul de timp: Raportarea la mişcare
Entropia: Comportament dezordonat
Săgeata timpului: O lume în haos
CAPITOLUL 8. Cosmogonia. Mituri şi metodologie
Analogii: Asemănări înşelătoare
Miturile: Viaţa universală
Teoriile: Lumea din mintea unui om
Filosofia presocratică: Durerile naşterii cosmologiei
Cosmologie fizică: Evoluţie ciclică
Cosmologia cuantică cu bucle: Închiderea cercului
CAPITOLUL 9. O singură lume. Ştiinţa ideală
Problemele valorii iniţiale: Momentul adevărului
Funcţia de undă a universului: Cuprinzând totul
Un univers – nici un univers: Pruncul din covată
Reprezentări fizice: Nimicul fără frontiere
Condiţii iniţiale dinamice: Legi măreţe
O singură lume? Ultimul ideal
O teorie universală? Fizică şi orgoliu
Principiile: Fundamentele ştiinţei
O singură teorie, o singură soluţie? Ai grijă ce-ţi doreşti

CAPITOLUL 11. Limitele științei și noblețea naturii

Table of Contents

Prefaţă	7
Introducere	10
CAPITOLUL 1. Gravitaţia. Atracţia masei	17
Legea newtoniană a gravitaţiei: Acţiunea la distanţă şi un neajuns fatal	19
Relativitatea spaţiului şi timpului: Transformări în staţiu-timp	23
Relativitatea generală: Spaţiul şi timpul se dezlănţuie	31
Spaţiul-timp curb: O scenă care se zguduie sub greutatea actorilor	40
Graniţele spaţiului şi timpului: Sfârşitul unei teorii	44
Absenţa respingerii: Pericolul de a fi prea atrăgător	53
CAPITOLUL 2. Teoria cuantică. Stabilitate incertă	59
Stabilitatea atomică: Preţul unei vieţi îndelungate	61
Funcţia de undă: Fluctuaţii, superpoziţii, limitări	63
Atomii: Stabilitate din inconstanţă	72
Limita clasică şi forţele efective: Spargerea valurilor	78
Radiaţia corpului negru: E simplu să te îmbraci în negru	87
Scările Planck: Despre enormitatea cuantică	90
CAPITOLUL 3. Un interludiu despre rolul matematicii. Începe lumea într-o ecuaţie?	94
Matematică doar de dragul ei? Matemagia	96
Utilizarea abuzivă a infinitului: Şmecheriile fizicii	99
Despre ipoteze şi teorii: Codul de conduită al teoreticianului	102
CAPITOLUL 4. Gravitaţia cuantică. Încercarea de a combina totul	105

Abordările gravitaţiei cuantice: Puterea stă în diversitate 108
Teoria corzilor: Cea mai bogată simfonie 109
Gravitaţia cuantică cu bucle: Atomi de spaţiu şi întuneric 114
Comparaţie: mere şi portocale 117
Gravitaţia cuantică cu bucle: Luminând întunericul 121
Începuturile: Jocuri mintale 122
Mai multe detalii: Garduri, fibre, filigrane 127
Universul discret: Ţeserea istoriei lumii 137
Cosmologia cuantică cu bucle: Netezirea atomilor 140
Mai puţin înseamnă mai mult: Cum să câştigi timp 147
Evitarea singularităţii: Ricoşeul întregului univers 151
Despre folosirea matematicii – un exemplu: Trecerea prin starea infernală 157
Aşadar, ce s-a întâmplat de fapt înainte de big bang? Întrebarea ultimă 162
Impenetrabilitate: Prin ceaţa trecutului 163
Uitarea cosmică: Amintiri înceţoşate 167
Limite: Nu există oare niciun răspuns ultim? 172
CAPITOLUL 5. Cosmologia observaţională. Sondarea întregului univers, a trecutului şi viitorului 177
Triada cosmologiei observaţionale: Un triumvirat puternic 180
Fondul cosmic de microunde: Distribuţii cereşti 181
Cartografierea galaxiilor: Milioane şi milioane de Căi-Lactee 189
Supernovele: Ultimele cuvinte înţelepte ale stelelor muribunde 192
Presiunea negativă: Respingerea greu sesizabilă 196
Energia întunecată: Cele 70 de procente necunoscute 197

Inflaţia: Speculaţii privind universul timpuriu 203
Poate fi observată gravitaţia cuantică? În căutare de indicii 211
Alte posibilităţi de testare: Să nu renunţi niciodată 216
Nucleosinteza big bang: Prepararea elementelor 217
Spaţiul-timp ca un cristal: Giuvaere goale 221
Găurile negre: Lumi ale întunericului 224
CAPITOLUL 6. Găurile negre. Colaps şi un final fericit? 228
Calea către o gaură neagră: A te juca cu focul 231
Primele stele: Arderea combustibilului 232
Piticele albe: Reci şi compacte 237
Stele neutronice: Ultima revoltă 240
Singularitatea centrală: Un înspăimântător punct în timp 244
Orizonturi: Punctul dincolo de care nu există cale de întoarcere 246
Singularităţi nude şi cenzura cosmică: Lege şi decenţă 259
Gravitaţie analogă: Găuri negre comune 263
Teoria cuantică a găurilor negre: Să-l faci pe cel fără glas să vorbească 268
Evoluţie cosmică? Naşterea lumilor 269
Radiaţia Hawking şi pierderea informaţiei: Dispare totul în neant? 274
Gravitaţia cuantică a găurilor negre: Viaţa trebuie să continue 279
CAPITOLUL 7. Săgeata timpului. O lume care îmbătrâneşte 294
Conceptul de timp: Raportarea la mişcare 295
Entropia: Comportament dezordonat 297
Săgeata timpului: O lume în haos 304

CAPITOLUL 8. Cosmogonia. Mituri şi metodologie 311
Analogii: Asemănări înşelătoare 314
Miturile: Viaţa universală 317
Teoriile: Lumea din mintea unui om 325
Filosofia presocratică: Durerile naşterii cosmologiei 326
Cosmologie fizică: Evoluţie ciclică 332
Cosmologia cuantică cu bucle: Închiderea cercului 339
CAPITOLUL 9. O singură lume. Ştiinţa ideală 344
Problemele valorii iniţiale: Momentul adevărului 346
Funcţia de undă a universului: Cuprinzând totul 349
Un univers – nici un univers: Pruncul din covată 352
Reprezentări fizice: Nimicul fără frontiere 354
Condiţii iniţiale dinamice: Legi măreţe 357
O singură lume? Ultimul ideal 361
O teorie universală? Fizică şi orgoliu 367
Principiile: Fundamentele ştiinţei 368
O singură teorie, o singură soluţie? Ai grijă ce-ţi doreşti 372
CAPITOLUL 11. Limitele ştiinţei şi nobleţea naturii 376